

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Babić

Zagreb, 2011. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Jerolim Andrić, dipl. ing.

Student:

Tomislav Babić

Zagreb, 2011. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, služeći se navedenom literaturom i uz stručnu pomoć Doc. dr. sc. Jerolima Andrića.

Zahvaljujem se mentoru, Doc. dr. sc. Jerolimu Andriću na pruženoj pomoći i stručnom vodstvu tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svim profesorima i asistentima na prenesenom znanju i na profesionalnoj suradnji tokom cijelog studija.

Posebno se zahvaljujem majci ali i cijeloj obitelji na strpljenju, razumijevanju i podršci tijekom studija.

Tomislav Babić



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
U.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Babić**

Mat. br.: 0035140098

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **STRUKTURNA ANALIZA TEREITNOG PROSTORA BRODA ZA RASUTI TERET**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STRUCTURAL STRENGTH ANALYSIS OF CARGO HOLD AREA OF BULK CARRIER**

Opis zadatka:

Zbog učestalih oštećenja konstrukcije brodova za rasuti teret Međunarodna udruga klasifikacijskih društava (IACS) nedavno je uvela nova, Usuglašena pravila za projektiranje i gradnju brodova za rasuti teret IACS CSR(BC). Između ostalih zahtjeva, uvedeni su i novi standardi za provođenje strukturne analize teretnog prostora (tri skladišta) metodom konačnih elemenata (MKE).

U okviru diplomskog zadatka potrebno je:

1. Analizirati dostupnu literaturu i upoznati se s Pravilima IACS CSR(BC). Posebnu pažnju posvetiti metodologiji provođenja proračuna strukturne analize (*Ch 7. Direct strength analysis*).
2. Izraditi MKE model konstrukcije broda za rasuti teret (nosivosti oko 50 000 DWT), prema priloženoj dokumentaciji dostupnoj na FSB, sukladno Pravilima IACS CSR(BC).
3. Za izgrađeni MKE model implementirati zahtijevane slučajeve opterećenja sukladno Pravilima IACS CSR(BC).
4. Provesti proračun odziva za definirane slučajeve opterećenja koristeći računalni program MAESTRO dostupan na FSB-u.
5. Izvršiti analizu podobnosti konstrukcije prema strukturnim kriterijima (popuštanje, izvijanje) definiranim u Pravilima IACS CSR(BC). U slučaju nezadovoljenja kriterija predložiti strukturno rješenje koje zadovoljava razmatrane kriterije.

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datum obrane:

6. listopada 2011.

8. prosinca 2011.

14. – 16. prosinca 2011.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Jerolim Andrić

Prof. dr. sc. Kalman Žiha

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA.....	II
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Definicija broda za prijevoz rasutog tereta (<i>bulk carrier</i>).....	1
2. ANALIZA IACS PRAVILA.....	5
2.1. Općenito o pravilima.....	5
2.2. Opis procedure strukturne analize.....	6
3. IZRADA MODELA.....	7
3.1. Prikaz modela.....	12
3.2. Priprema modela za implementaciju opterećenja.....	15
3.3. Korozija.....	17
4. DEFINICIJA I IMPLEMENTACIJA OPTEREĆENJA.....	22
4.1. Uvod.....	22
4.2. Komponente opterećenja [1].....	23
4.2.1. Vanjski tlakovi.....	23
4.2.2. Unutarnji tlakovi.....	25
4.3. Opterećenja.....	26
4.4. Implementirana opterećenja.....	30
4.5. Rubni uvjeti.....	33
4.6. Balansiranje modela.....	34
4.7. Rezultati primarne čvrstoće.....	38
5. ANALIZA PODOBNOSTI KONSTRUKCIJE.....	39
5.1. Evidentirana oštećenja.....	41
5.2. Prijedlozi zahvata na konstrukciji u svrhu zadovoljenja IACS Pravila.....	57
6. ZAKLJUČAK.....	81
7. LITERATURA.....	82
8. PRILOG.....	83

POPIS SLIKA

Slika 1.	Brod za prijevoz rasutog tereta.....	1
Slika 2.	Opći plan broda za rasute terete [3]	2
Slika 3.	Zone na koje se odnose zahtjevi IACS UR [3].....	4
Slika 4.	Vremenska linija uvođenja pravila [4].....	5
Slika 5.	Dijagram toka procedure [1].....	6
Slika 6.	Geometrija glavnog rebra [5]	8
Slika 7.	Uzdužna struktura glavnog rebra [5].....	9
Slika 8.	Poprečna struktura glavnog rebra [5].....	10
Slika 9.	Poprečna naborana pregrada [5].....	11
Slika 10.	Cijeli MKE model tri skladišta.....	12
Slika 11.	Polovinski MKE modela tri skladišta	12
Slika 12.	Prikaz MKE modela skladišta 3	13
Slika 13.	Centralni dio skladišta 3.....	14
Slika 14.	Karakteristični segment teretnog prostora.....	14
Slika 15.	Skladišni prostor.....	15
Slika 16.	Donji uzvojni tank.....	16
Slika 17.	Gornji uzvojni tank.....	16
Slika 18.	Debljine materijala	17
Slika 19.	Debljine materijala poprečne strukture.....	18
Slika 20.	Vrste čelika korištenih za izradu modela.....	19
Slika 21.	Hidrostatski tlak	23
Slika 22.	Hidrodinamički tlak za H1, H2, F1 i F2	23
Slika 23.	Hidrodinamički tlak za R1 i R2.....	24
Slika 24.	Hidrodinamički tlak za P1 i P2.....	24
Slika 25.	Unutarnji tlakovi.....	25
Slika 26.	Dinamički tlakovi za LC4.....	31
Slika 27.	Tlakovi tereta za LC12.....	31
Slika 28.	Prsten.....	33
Slika 29.	„Target“ koordinate.....	34
Slika 30.	Vertikalni moment savijanja.....	36
Slika 31.	Vertikalna smična sila.....	36
Slika 32.	Horizontalni moment savijanja.....	37
Slika 33.	Horizontalna smična sila.....	37
Slika 34.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata dna u LC4 sa kriterijem PCCB.....	44
Slika 35.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata dna u LC8 sa kriterijem PCSF.....	44
Slika 36.	Najmanji postignuti faktor podobnosti rebrenica u LC4 sa kriterijem PCCB.....	45
Slika 37.	Najmanji postignuti faktor podobnosti rebrenica u LC5 sa kriterijem PCCB.....	45
Slika 38.	Najmanji postignuti faktor podobnosti rebrenica u LC9 sa kriterijem PCCB.....	46
Slika 39.	Najmanji postignuti faktor podobnosti rebrenica u LC10 sa kriterijem PCCB.....	46
Slika 40.	Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnog nosača na 11690 od CL-a u LC4 sa kriterijem PCSF.....	47
Slika 41.	Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnog nosača na 11690 od CL-a u LC8 sa kriterijem PCCB.....	47
Slika 42.	Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnog nosača na 11690 od CL-a u LC11 sa kriterijem PCCB.....	48

Slika 43.	Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnog nosača na CL-u u LC12 sa.....	48
Slika 44.	Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnog nosača na CL-u u LC14 sa....	49
Slika 45.	Najmanji postignuti faktor podobnosti pokrova dvodna u LC12 sa kriterijem PCSF.....	49
Slika 46.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate donjeg uzvojnog tanka u LC4 sa.	50
Slika 47.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate boka broda u LC1 sa kriterijem PCSF.....	50
Slika 48.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate boka broda u LC9 sa kriterijem PCSF.....	51
Slika 49.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate gornjeg uzvojnog tanka u LC1 sa kriterijem PCSF	52
Slika 50.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate gornjeg uzvojnog tanka između uzdužnjaka br. 9 i oplate boka u LC1 sa kriterijem PCCB.....	52
Slika 51.	Najmanji postignuti faktor podobnosti naprezanje oplate gornjeg uzvojnog tanka u LC1 sa kriterijem PFLB.....	53
Slika 52.	Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnjaka gornjeg uzvojnog tanka u LC15 sa kriterijem GCT	53
Slika 53.	Najmanji postignuti faktor podobnosti okvira poprečne strukture gornjeg uzvojnog tanka u LC14 sa kriterijem PCMY.....	54
Slika 54.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate palube između grotlenih otvora u LC1 sa kriterijem PCSF.....	55
Slika 55.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate palube između grotlenih otvora u LC3 sa kriterijem PFLB.....	55
Slika 56.	Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate uzdužne praznice grotla u LC5 sa kriterijem PCCB	56
Slika 57.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture dna za PCCB kriterij.....	57
Slika 58.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture dna za PCSF kriterij.....	58
Slika 59.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCCB kriterij ...	59
Slika 60.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCSF kriterij	60
Slika 61.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCCB kriterij ...	61
Slika 62.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCCB kriterij ...	62
Slika 63.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na 11690 od CL-a za PCCB kriterij.....	63
Slika 64.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na 11690 od CL-a za PCCB kriterij.....	64
Slika 65.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na 11690 od CL-a za PCSF kriterij.....	65
Slika 66.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na CL-u	66
Slika 67.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na CL-u	67
Slika 68.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture pokrova dvodna	68
Slika 69.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplate uzvojnog tanka.....	69
Slika 70.	Stanje nakon implementacije prije dloga za LC1 sa PCSF kriterijem	70
Slika 71.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplate boka	71
Slika 72.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplate gornjeg uzvojnog tanka	72
Slika 73.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplate gornjeg uzvojnog tanka	73

Slika 74.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplata gornjeg uzvojnog tanka	74
Slika 75.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture ukrepa gornjeg uzvojnog tanka	75
Slika 76.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture okvira gornjeg uzvojnog tanka	76
Slika 77.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplata palube između grotlenih otvora.....	77
Slika 78.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplata palube između grotlenih otvora.....	78
Slika 79.	Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužne praznice grotla.....	79

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Tipični tereti [3].....	3
Tablica 2.	Korozijski odbitak.....	20
Tablica 3.	Definicija slučajeva opterećenja [1].....	22
Tablica 4.	Kombinacijski faktori opterećenja [1]	26
Tablica 5.	Opis slučajeva opterećenja [1]	27
Tablica 6.	Podaci o stanjima krcanja	30
Tablica 7.	Slučajevi opterećenja	32
Tablica 8.	Kruta veza oba kraja [1].....	33
Tablica 9.	Dozvoljeni pomaci [1]	33
Tablica 10.	Odnos rezultata primarne čvrstoće za brod Prototip i brod Prijedlog.....	38
Tablica 11.	Označavanje kriterija u „Maestru“ [2].....	40
Tablica 12.	Oštećenja konstrukcije i prijedlozi poboljšanja konstrukcije.....	42
Tablica 13.	Usporedba PCCB i IACS kriterija.....	80

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
E	N/mm^2	Youngov modul
σ_{dop}	N/mm^2	Dopušteno naprezanje
t_c	mm	Korozijski odbitak
$M_{i,w,\text{hogg}}$	kNm	Moment savijanja na mirnoj vodi u stanju pregiba
$M_{i,w,\text{sagg}}$	kNm	Moment na savijanja mirnoj vodi u stanju progiba
$M_{V_aft_SF}$	kNm	Vertikalni moment uslijed poprečne sile na krmenom kraju modela
$M_{V_fore_SF}$	kNm	Vertikalni moment uslijed poprečne sile na pramčanom kraju modela
x_{fore}	m	Udaljenost pramčanog rubnog uvjeta
x_{aft}	m	Udaljenost krmenog rubnog uvjeta
Q_{VT}	N	Vertikalna poprečna sila dobivena prema IACS Pravilima
Q_{VFEM}	N	Vertikalna poprečna sila dobivena iz MKE proračunom
$M_{H_aft_SF}$	kNm	Horizontalni moment uslijed poprečne sile na krmenom kraju modela
$M_{H_fore_SF}$	kNm	Horizontalni moment uslijed poprečne sile na pramčanom kraju modela
Q_{HT}	N	Horizontalna smična sila dobivena prema IACS Pravilima
Q_{HFEM}	N	Horizontalna smična sila dobivena MKE proračunom
$M_{V_aft_BM}$	kNm	Vertikalni moment savijanja na krmenom djelu modela
$M_{V_fore_BM}$	kNm	Vertikalni moment savijanja na pramčanom djelu modela
M_{VT}	kNm	Vertikalni moment dobiven prema IACS Pravilima
M_{VFEM}	kNm	Vertikalni moment dobiven MKE proračunom
$M_{H_aft_BM}$	kNm	Horizontalni moment savijanja na krmenom djelu modela
$M_{H_fore_BM}$	kNm	Horizontalni moment savijanja na pramčanom djelu modela
M_{HT}	kNm	Horizontalni moment savijanja dobiven prema IACS Pravilima
M_{HFEM}	kNm	Horizontalni moment savijanja dobiven MKE proračunom
C	N/mm^2	Izdržljivost
D	N/mm^2	Naprezanje
g	/	Faktor podobnosti
γ	/	Koeficijent sigurnosti
σ_{eq}	N/mm^2	Von Misesovo ekvivalentno naprezanje
σ_x	N/mm^2	Normalno naprezanje u smjeru osi x
σ_y	N/mm^2	Normalno naprezanje u smjeru osi y
τ_{xy}	N/mm^2	Smično naprezanje
MKE	/	Metoda konačnih elemenata
IACS	/	<i>International Association of Classification Societies</i>

SAŽETAK

Diplomski rad se bavi primjenom novih Usuglašenih IACS Pravila [1] na brodove za prijevoz rasutog tereta u dijelu strukturne analize brodske konstrukcije. Naime od travnja 2006. godine vrijede nova zahtjevnija pravila za brodove duže od 90 metara i odnose se u glavnom na modifikacije brodske konstrukcije. Stoga, cilj diplomskog rada je upoznati se s istim, izraditi MKE model konstrukcije broda za rasuti teret, za izrađeni MKE model implementirati zahtijevane slučajeve opterećenja sukladno IACS Pravilima, te provesti proračun odziva za definirane slučajeve opterećenja koristeći se metodom konačnih elemenata (MKE), izvršiti analizu podobnosti konstrukcije prema strukturnim kriterijima definiranim u IACS Pravilima, te prilagoditi model novim pravilima kako bi ih zadovoljavao.

Cijeli rad podijeljen je na nekoliko cjelina:

- upoznavanje s novim Pravilima;
- izrada MKE modela i priprema modela za zadavanje opterećenja;
- implementacija opterećenja i proračun odziva;
- analiza dobivenih rezultata te prijedlog za modifikaciju konstrukcije broda

Pomoću programskog paketa „Maestro“ [2] izrađen je MKE model brod (50 000 dwt) koji se sastoji od tri skladišta. Prilikom modeliranja korištena je tehnička dokumentacija dostupna na FSB-u. Iako model obuhvaća tri skladišta rezultati su razmatrani samo u središnjem tanku. Isti programski paket korišten je za implementaciju i proračun odziva konstrukcije. Nakon provedenog proračuna provedena je analiza dobivenih rezultata i podobnosti te su predložene modifikacije strukture u svrhu zadovoljavanja navedenih IACS Pravila.

NAPOMENA:

U izradi su jedinstvena IACS Pravila za tankere i brodove za rasuti teret.

1. UVOD

1.1. Definicija broda za prijevoz rasutog tereta (*bulk carrier*)

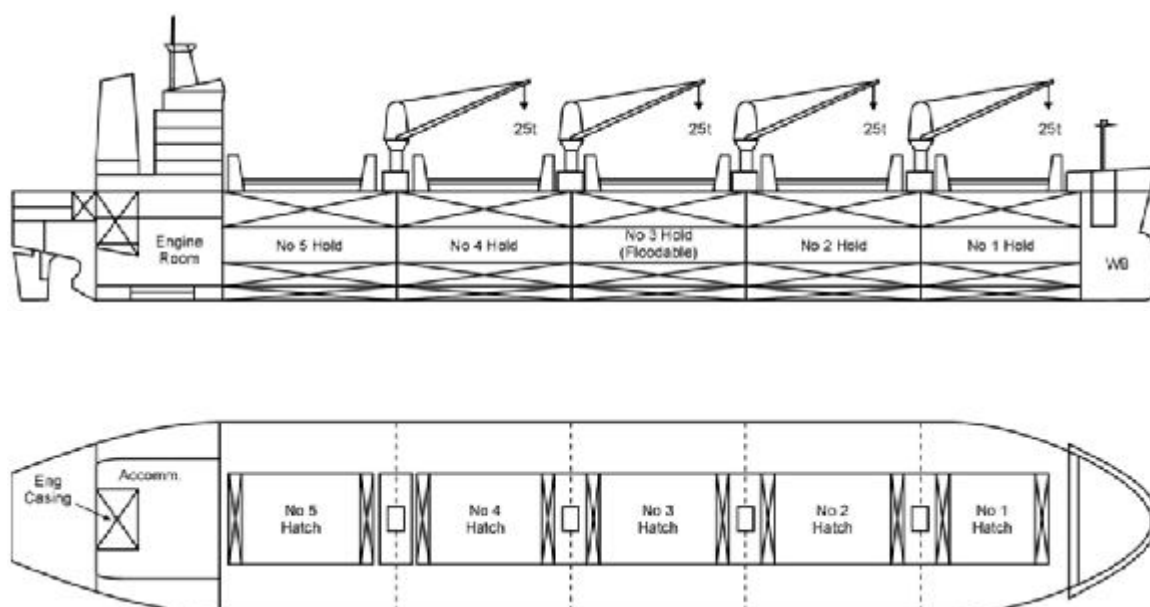
Prema SOLAS-u (*Safety Of Life At Sea*) Poglavlje XI-Reg.1, brod za prijevoz rasutog tereta definiran je kao brod koji obično ima jednu, glavnu palubu, bočne tankove i uzvojne tankove uz glavne tovarne prostore. Primarna mu je namjena prijevoz suhih rasutih tereta, što uključuje rudaču i kombinirane terete. Svi moderni brodovi za rasuti teret izgrađeni su prema SOLAS-ovoj definiciji.

Brod za prijevoz rasutog tereta definirala su sva važnija klasifikacijska društva, prema njima to je plovilo konstruirano za prijevoz rasutog tereta, ili pomorsko plovilo s jednom palubom i motornim pogonom smještenim na krmi za prijevoz rasutog tereta. SOLAS-ova definicija je relativno limitirana, pa brodovi za opće terete, kontejnerski brodovi koji prevoze rasuti teret i brodovi za prijevoz rasutog tereta s dvostrukom oplatom se ne uključuju u ovu definiciju. Općenito, to je brod koji osim glavnih tankova ima bočne i uzvojne tankove te naborane poprečne pregrade i služi za prijevoz rasutog tereta kao što je rudača, ugljen i žitarice [3].



Slika 1. Brod za prijevoz rasutog tereta

Opći plan broda za prijevoz rasutog tereta traži kompromise između više zahtjeva koji su često međusobno u koliziji. Opći plan bi trebao pomiriti sve funkcije broda koje brod mora obavljati, balansirati između različitih zahtjeva i to sve unutar ograničenog prostora na brodu. Smještaj motornog postrojenja i teretnih prostora jedan je od glavnih zadataka prilikom projektiranja. Naime, strojarnica, potrebni prostori za pitku vodu, gorivo, balastni tankovi moraju minimalno utjecati na gaz, a s druge strane moraju osigurati dovoljan doplov. Nadalje brodograđevni inženjeri moraju pomiriti zahtjeve za što jednostavnijom izradom, a da se ne dovede u pitanje strukturni integritet. Osnovne dimenzije brodova najčešće određuju brodovlasnici, budući da su one obično ograničene lukama u kojima će brod pristajati, ali i studijom o ekonomskoj isplativosti.



Slika 2. Opći plan broda za rasute terete [3]

Ovisno o nosivosti brod za prijevoz rasutog tereta dijelimo u četiri skupine. *Capesize*, preko 80 000 tona dwt-a, *Panamax* 50 000 – 80 000 tona, *Handymax* 35 000 – 50 000 tona i *Handysize* 10 000 – 35 000.

Rasuti teret podijeljen je u četiri kategorije: metalna rudača, poljoprivredni tereti, energenti i četvrta kategorija je „drugo“. U kategoriju metalnih rudača spadaju željezna rudača, čelik, staro željezo i sirovo željezo. Žito, soja, gnojiva spadaju u poljoprivredne terete. U energente spadaju ugljen, boksit i drvo [3].

Postoji nekoliko vrsta brodova za prijevoz rasutog tereta, kako što su brodovi s otvorenim grotlima, brodovi opremljeni dizalicama na palubi, itd. Tako opremljeni brodovi sami istovaruju teret u lukama i nisu ovisni o opremi za istovar u lukama [3].

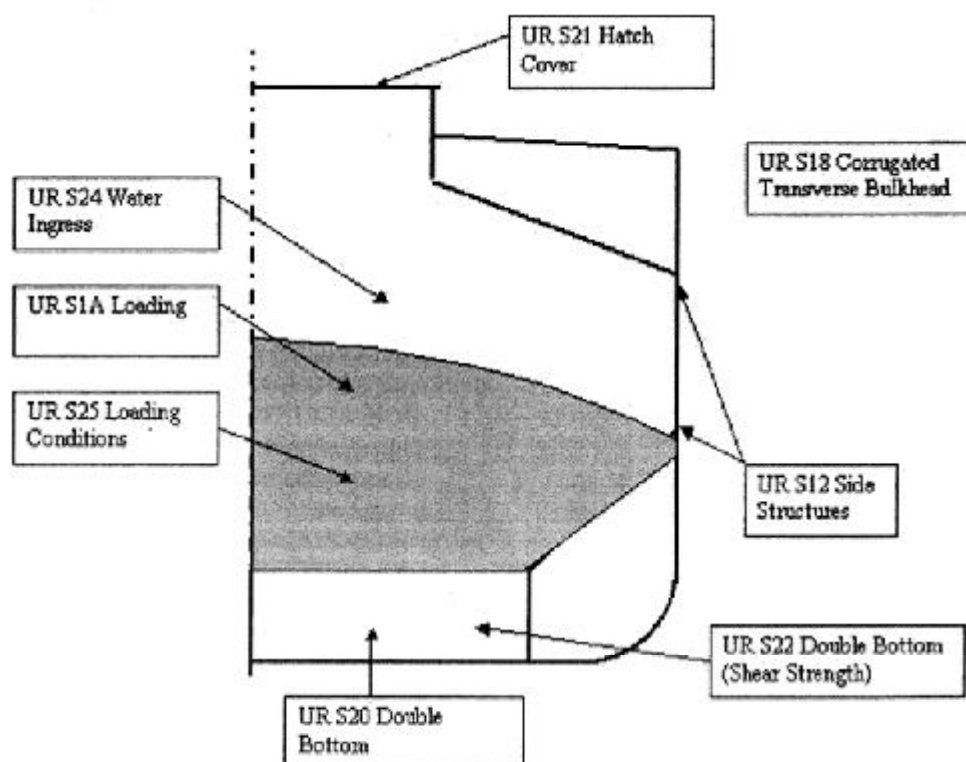
Kao što vidimo ovim se brodovima prevoze različite vrste tereta. Stoga je teret definiran faktorom slaganja. Faktor slaganja predviđa koliko će kubičnih metara teretnog prostora biti zauzeto jednom tonom nekog tereta. Suhi rasuti teret ima faktore slaganja od 3.49 t/m^3 pa do 0.36 t/m^3 . Lista tipičnih tereta prikazana je **Tablicom 1.**

Tablica 1. Tipični tereti [3]

<i>Commodity</i>	<i>Stowage factor, ft³/long ton</i>	<i>Stowage factor, m³/long ton</i>	<i>Specific gravity, ton/m³</i>
Iron Ore	12–15	0.34–0.42	3–2.42
Coal	42–48	1.2–1.36	0.85–0.75
Grain heavy	42–56	1.2–1.42	0.85–0.72
Grain light	55–60	1.56–1.7	0.65–0.6
Bauxite	28–35	0.79–0.99	1.29–1.03
Phosphate/rock	33–34	0.91–0.96	1.12–1.06
General	24–29	0.69–0.82	1.47–1.24

Havarije brodova za prijevoz rasutog tereta u posljednjih desetak godina prouzrokovale su mnoge gubitke života i tereta. U nekim slučajevima oštećenja i korodiranost su bila takvi da su brodovi naprosto nestali bez ikakvog upozorenja i bez preživjelih. Bilo je nekoliko pokušaja prevencije nesreća od strane klasifikacijskih društava i IMO-a (*International Maritime Organization*). Zaključeno je da bi se konkretne mjere trebale poduzeti u smislu boljeg održavanja brodova, te sigurnijeg projektiranja. Stoga je *International Association of Classification Societies* (IACS) uveo nova Usuglašena Pravila (*IACS Unified Requirements*) koja na cjeloviti način definiraju opterećenja, dimenzijama strukturnih elemenata, pregrada i limova, itd. U usporedbi s tankerima, brodovi za prijevoz rasutog tereta imaju nedostatke u strukturi (veliki grotleni otvori) ali i teže radne uvjete. Rukovanje teretom tijekom utovara i istovara uzrokuje oštećenja okvira tankova i poprečnih naboranih pregrada pneumatskim čekićima. Prilikom utovara i istovara oštećenja nastaju i na pokrovu dvodna zbog teških buldožera i grabilica dizalica. Ugljen koji sadrži velike koncentracije sumpora uzrok je korozije na orebrenju tankova. Zbog toga Usuglašena Pravila zahtijevaju pojačanja postojećih jednooplatnih brodova dužine 150 m koji prevoze teret gustoće 1.78 t/m^3 i veće.

Posebna pozornost usmjerena je čvrstoći naboranih pregrada i strukturi dvodna najudaljenijih skladišta. Ispitivan je i stabilitet oštećenog broda za slučaj naplavljenog najudaljenijeg skladišta. Sam postupak krcanja treba biti razvijen s obzirom na brzinu krcanja, kapacitete debalastiranja te postojeća ograničenja čvrstoće. IACS zahtjeva da se računalo za utovar nalazi na brodu kako bi se mogla proračunati uzdužna čvrstoća za različita stanja krcanja bez obzira na gustoću tereta ili dimenzije strukture. **Slika 3** prikazuje zone na kojima se odnose Usuglašena Pravila [3].



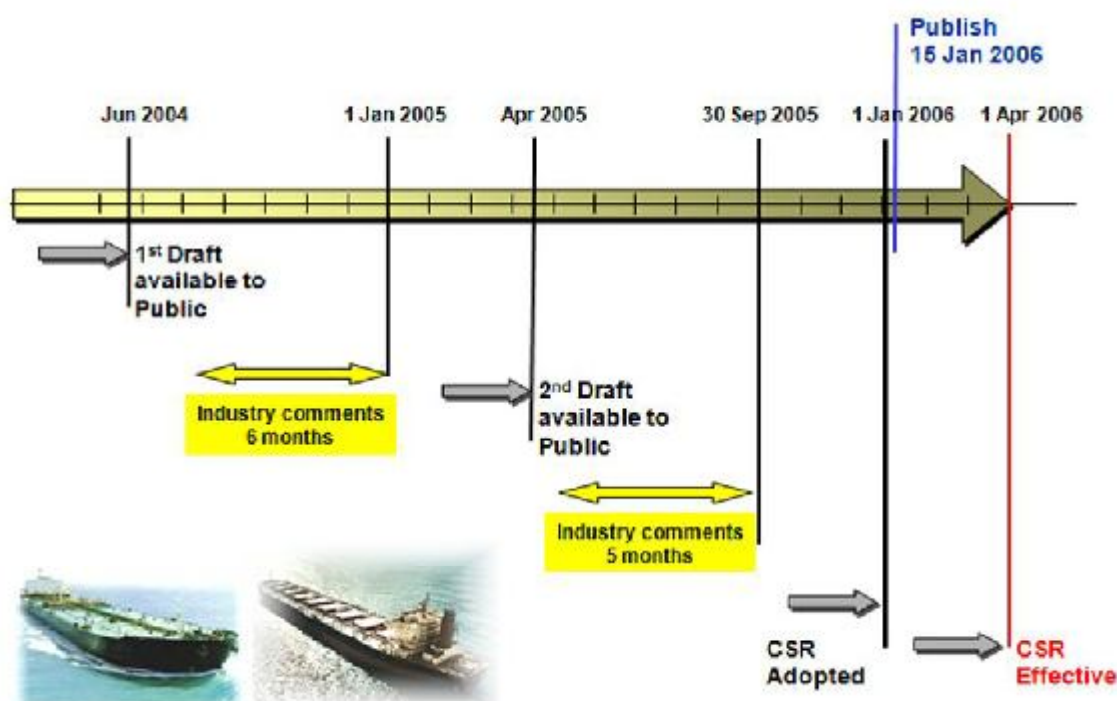
Slika 3. Zone na koje se odnose zahtjevi IACS UR [3]

2. ANALIZA IACS PRAVILA

2.1. Općenito o pravilima

U IACS-u su bili svjesni da se Pravila neće moći početi primjenjivati odjednom, jer to je proces koji će trajati i nekoliko godina. Donošenje Pravila i njihova primjena odvijala se u više koraka. Prikupljani su komentari i prijedlozi brodogradilišta s jedne i brodovlasnika s druge strane u nekoliko navrata.

Na kraju su Pravila objavljena 15. siječnja 2006., a 1. travnja 2006. se počelo s primjenom.



Slika 4. Vremenska linija uvođenja pravila [4]

U ovom radu posebna pažnja usmjerena je Poglavljima 4 i 7 navedenih IACS Pravila. U Poglavlju 4 dane su smjernice za primjenu Pravila vezana za opterećenja koja će biti narinuta modelu. Opterećenja uključuju poprečna opterećenja okomita na oplatu i opterećenja konstrukcije trupa na valovima i na mirnoj vodi.

Poglavljem 7 opisana je direktna procedura analize čvrstoće. Procedura se bazira na analizi 3-D modela metodom konačnih elemenata (MKE).

2.2. Opis procedure strukturne analize

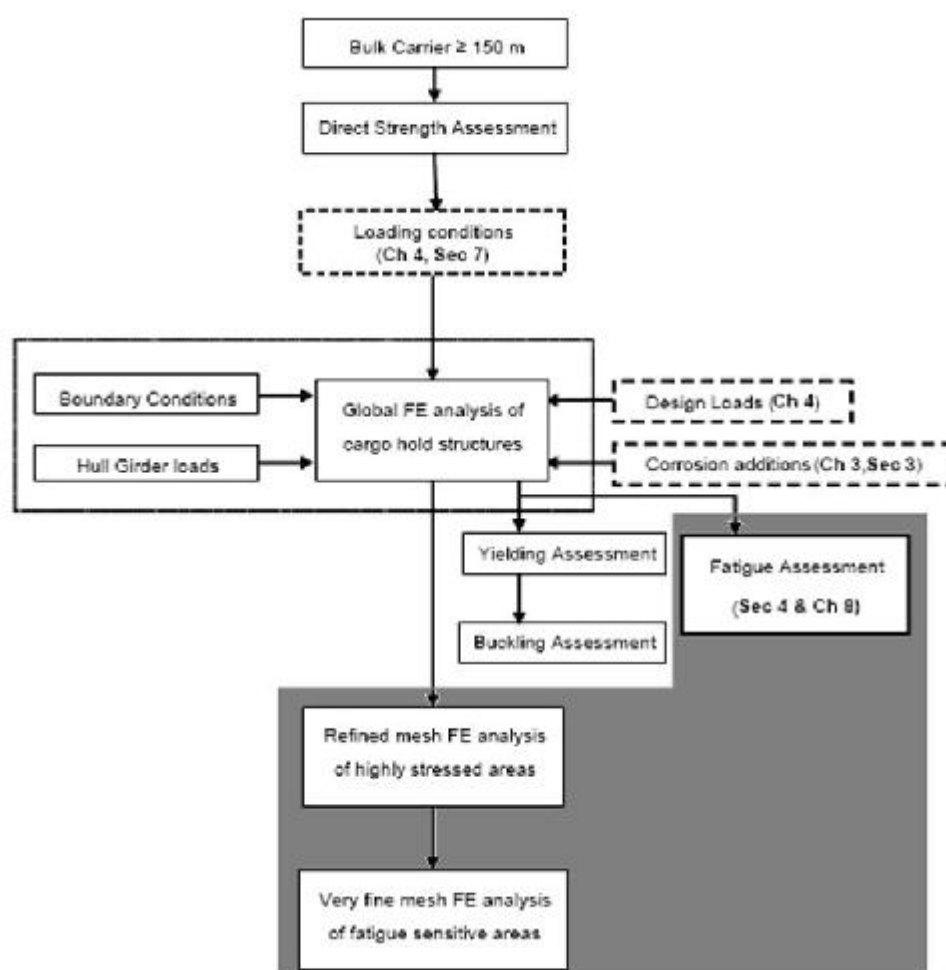
Procedura propisana Pravilima fokusirana je na direktnu analizu čvrstoće strukturnih elemenata u skladišnim prostorima broda. Namjena globalne analize čvrstoće metodom konačnih elemenata skladišnih prostora je provjera dali su neki, nama zanimljivi parametri unutar prihvatljivih kriterija za određena statička i dinamička opterećenja.

Provjeravam o sljedeće:

- razinu naprezanja u nosačima trupa i sve dimenzije primarnih elemenata čvrstoće;
- otpornost na izvijanje primarnih elemenata čvrstoće;
- dopuštene progibe primarnih elemenata čvrstoće.

Navedena procedura prikazana je **Slikom 5**.

NAPOMENA: osjenčan dio nije se razmatrao u ovom radu.



Slika 5. Dijagram toka procedure [1]

3. IZRADA MODELA

Prvi korak u izradi modela je postavljanje čvorova u 3D prostoru. Čvorovi se postavljaju na mjesta na kojima se spajaju ukrepni elementi s vojevima. Između čvorova postavljeni su vojevi čelika. Svaki voj predstavlja jedan konačni element koji je određen razmakom između čvorova, te samom svojom debljinom materijala.

Kako bi bila pravilno prikazana 3-D mrežu čvorova, kao i ukrepljenja svakog elementa konstrukcije korišteni su određeni principi:

- 1) Uzdužnjaci su modelirani kao grede sa aksijalnom, smičnom i savojnom krutošću.
- 2) Oplata je modelirana pločastim četverokutnim i trokutnim elementima koji imaju bi-aksijalnu, smičnu i savojnu krutost. Trokutni elementi se trebaju izbjegavati koliko god je to moguće osobito u područjima velikih naprezanja kao što su otvori, veze koljena i područja gdje očekujemo značajna naprezanja.
- 3) Poprečni okviri u gornjem i donjem uzvojnog tanku i rebra modelirani su kombinacijom pločastih elemenata (struk) i štapnih elemenata kojim su modelirani pojasevi.

Kada ne koristimo ortotropne elemente mreža je definirana na sljedeći način [1]:

- veličina mreže mora biti jednaka ili manja od razmaka uzdužnjaka u poprečnom smislu, te u uzdužnom smislu tri do pet elemenata između jakih poprečnih nosača;
- ukrepljenja su modelirana koristeći štapne elemente;
- mreža elemenata poprečne čvrstoće podijeljena je na najmanje tri elementa po visini (rebrenice), ako poprečna struktura unutar uzvojnog tanka i *wing* tanka nema dovoljno visine između dva obična uzdužna nosača, dovoljna je podjela na dva elementa;
- rebra sa svojim koljenima modelirana su koristeći pločaste elemente za modeliranje struka u kombinaciji sa gredama ili štapovima, rebra su podijeljena na manje elemente po visini;
- omjer stranica pločastih elemenata ne prelazi 1:4.

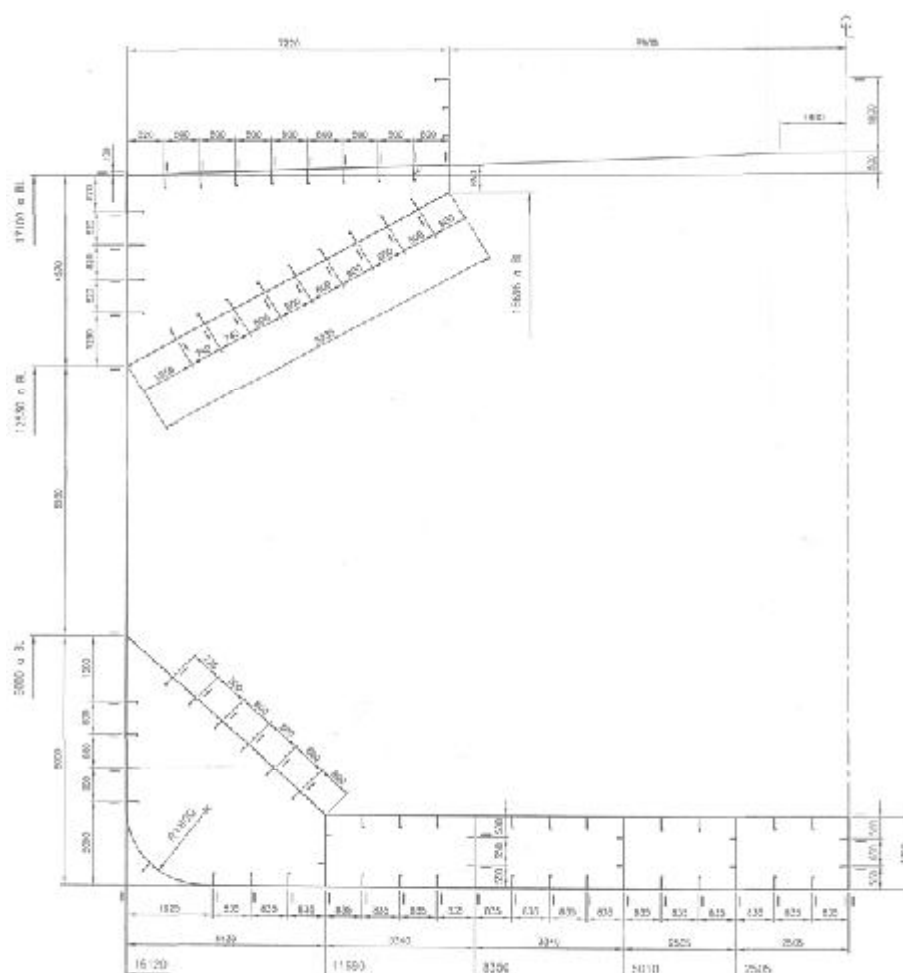
MKE model je izrađen na temelju nacrtu glavnog rebra postojećeg broda koji je izgrađen u Brodosplitu i koji je projektiran po IACS Pravilima, novogradnja 466, 467.

Glavne značajke broda:

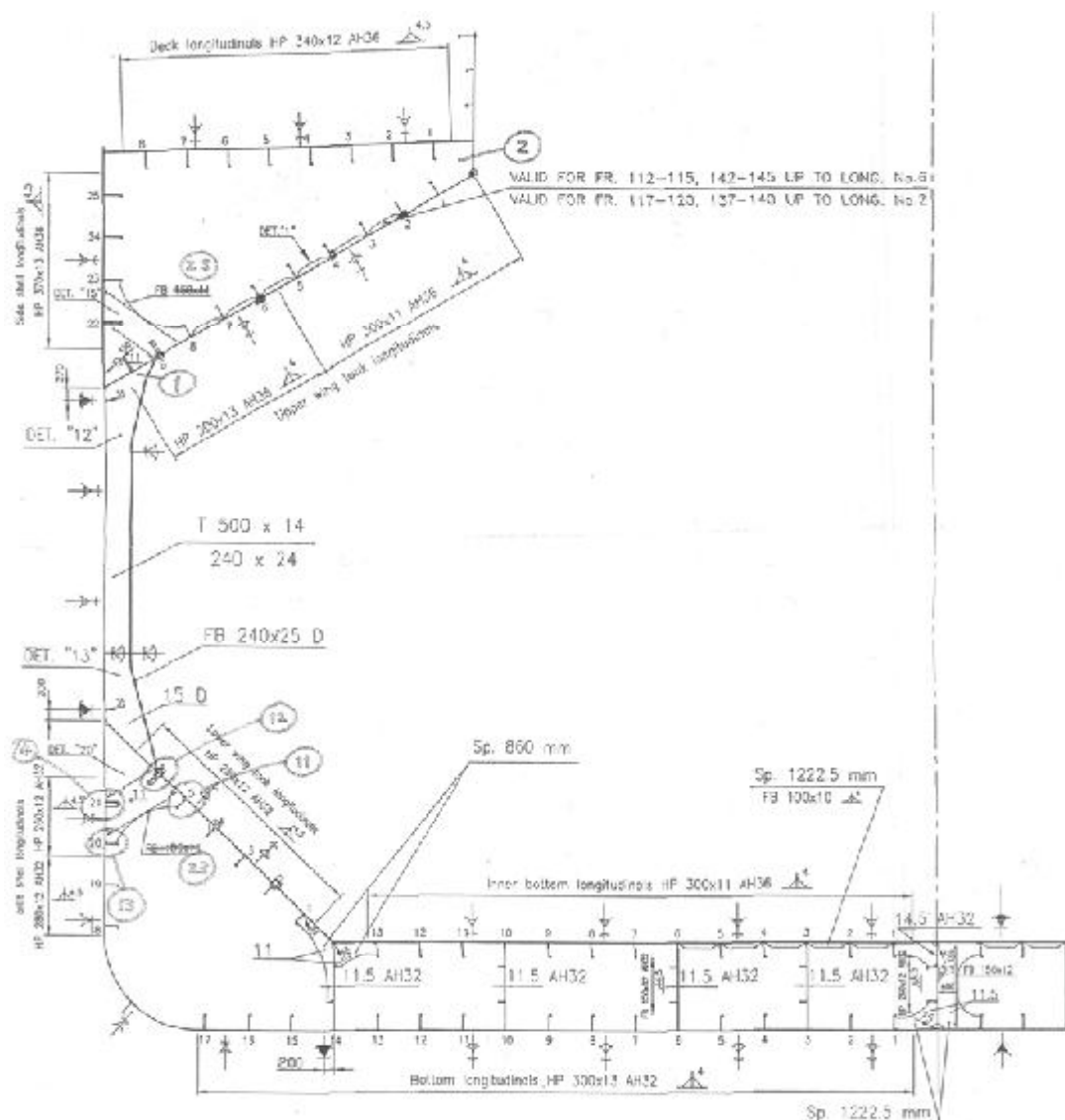
Duljin preko svega, L_{oa}	189.9 [m]
Duljina između perepen dikulara, L_{pp}	182 [m]
Širina, B	32.24 [m]
Gaz, T	17.1 [m]
Blok koeficijent, C_b	0.83
Nosivost	50000 [DWT]

Modelirana je prototipna konstrukcija koja nije obuhvatila poboljšanja kao što su dodatne ukrepe protiv uvijanja koje se mogu primijeniti na nacrtu.

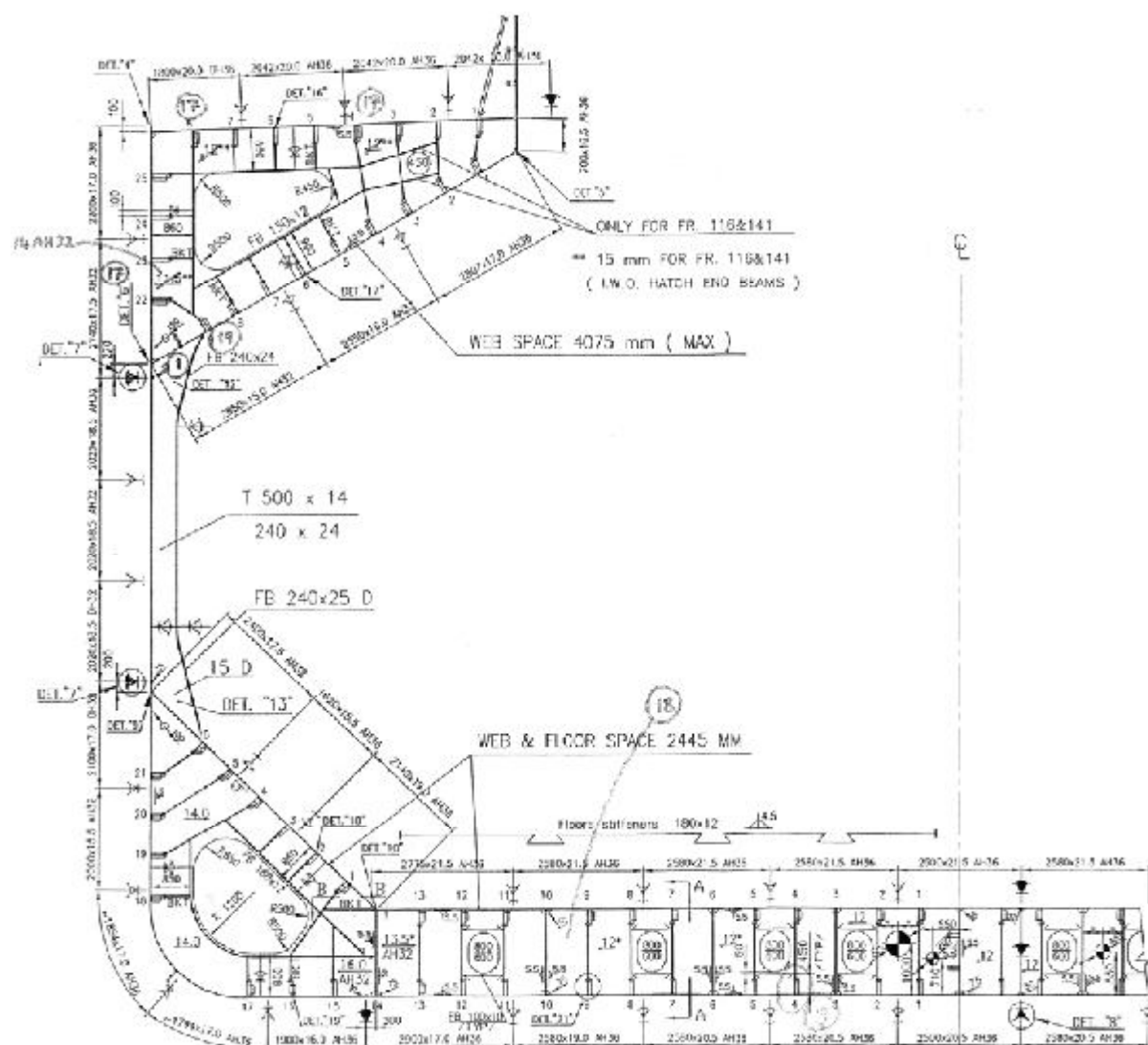
Na sljedećim slikama prikazani su nacrti glavnog rebra.



Slika 6. Geometrija glavnog rebra [5]

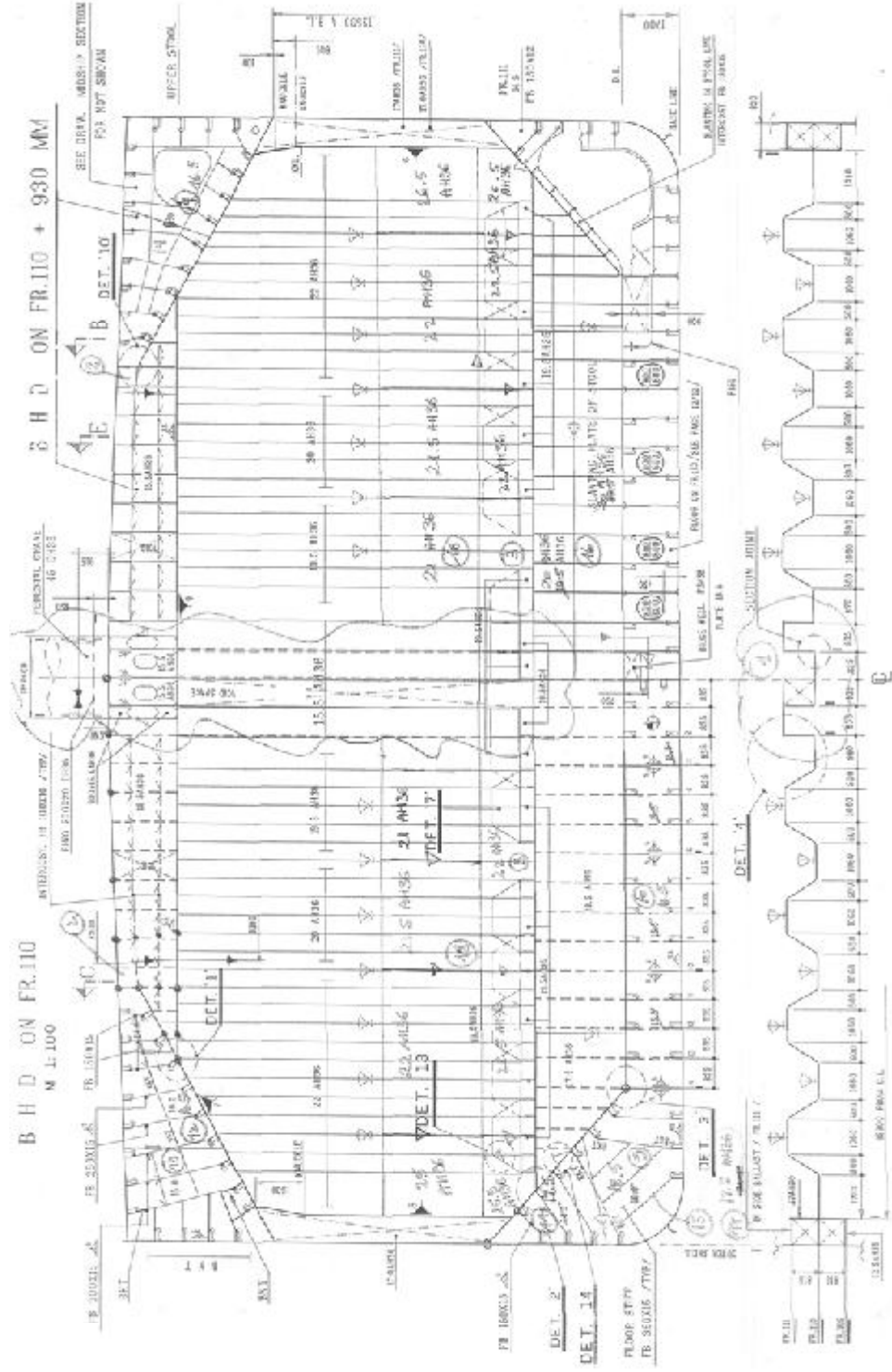


Slika 7. Uzdužna struktura glavnog rebara [5]



Slika 8. Poprečna struktura glav nog rebra [5]

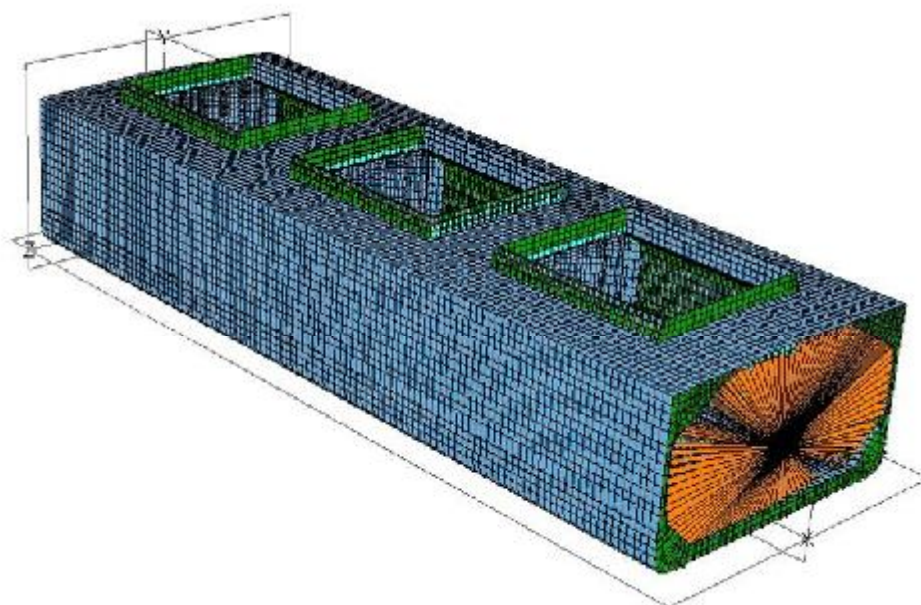
Razmak rebara je 2445 mm (3x815), dok je razmak okvira gornjeg uzvojnog tanka 4075 mm (5x815).



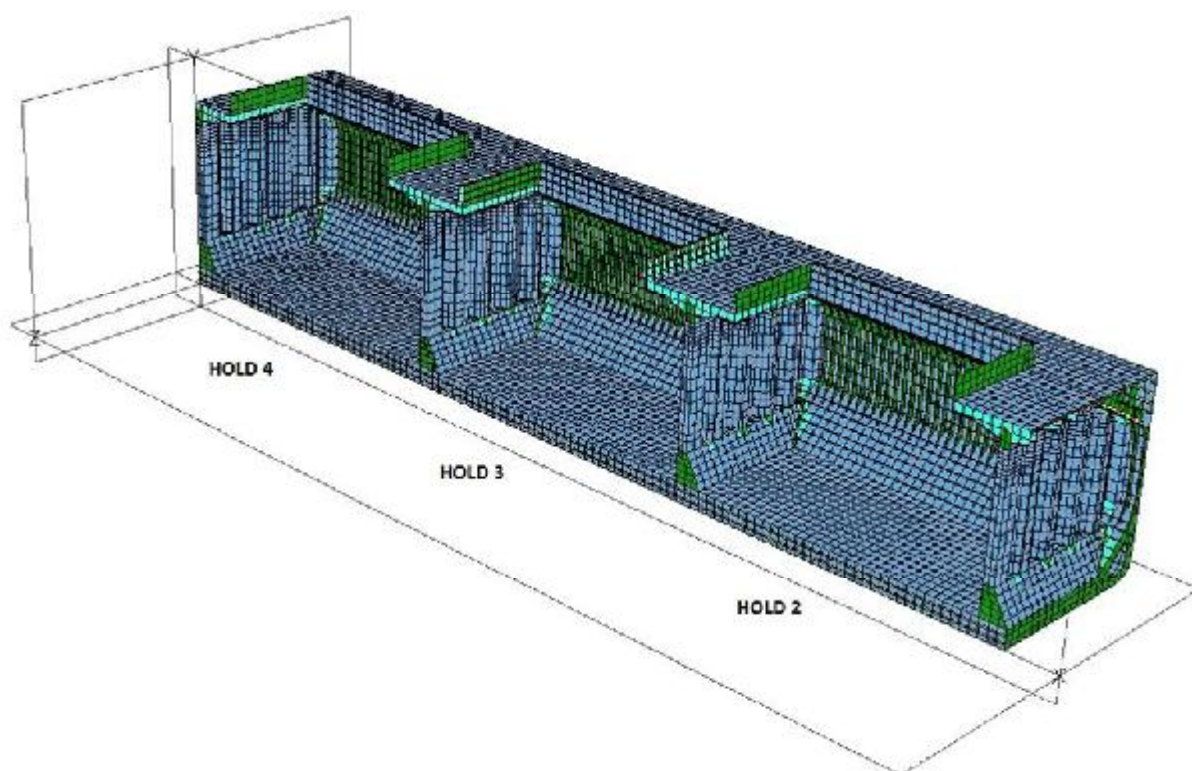
Slika 9. Poprečna naborana pregrada [5]

3.1. Prikaz modela

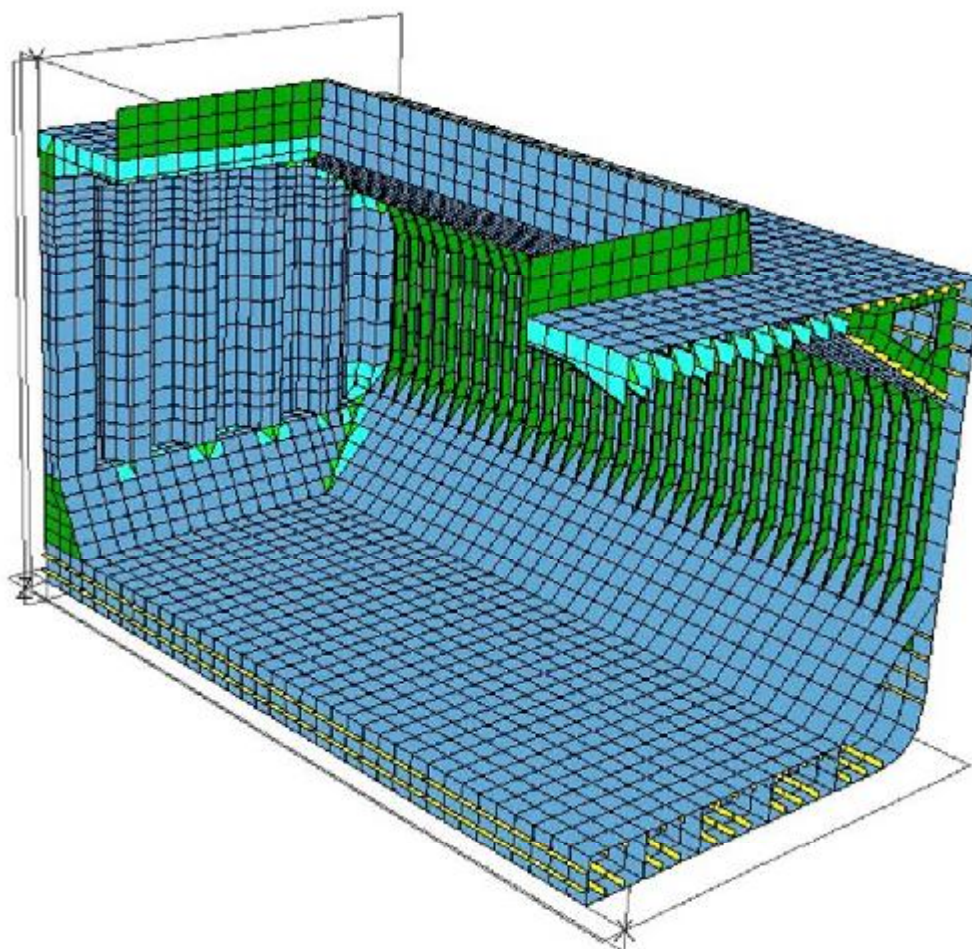
Slike koje slijede prikazuju model kao i neke njegove sastavne dijelove, te služe samo o kao vizualna prezentacije kompleksnosti modela koji se analizira.



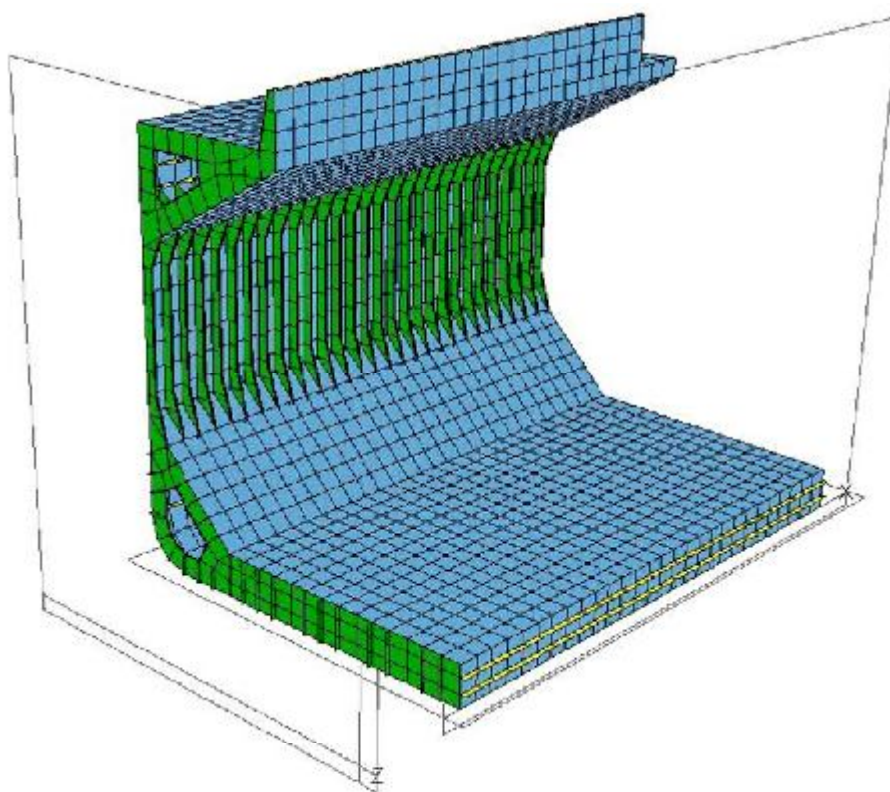
Slika 10. Cijeli MKE model tri skladišta



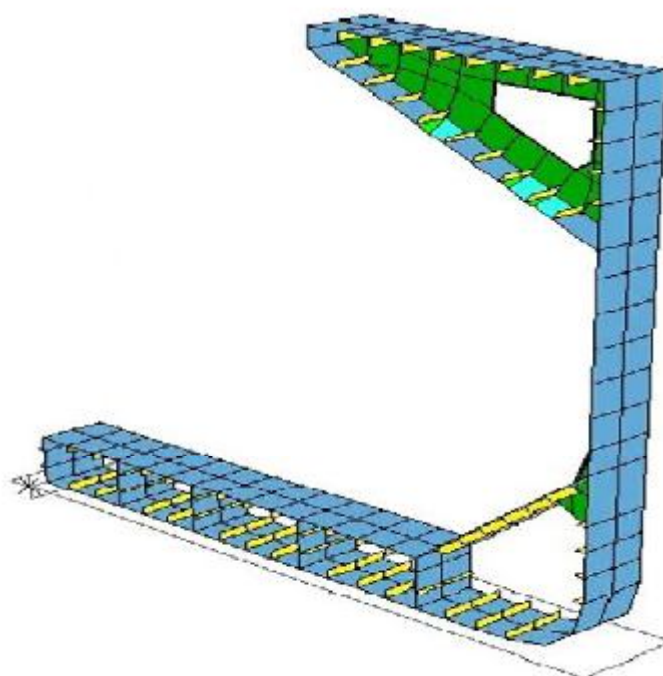
Slika 11. Polovinski MKE modela tri skladišta



Slika 12. Prikaz MKE modela skladišta 3



Slika 13. Centralni dio skladišta 3

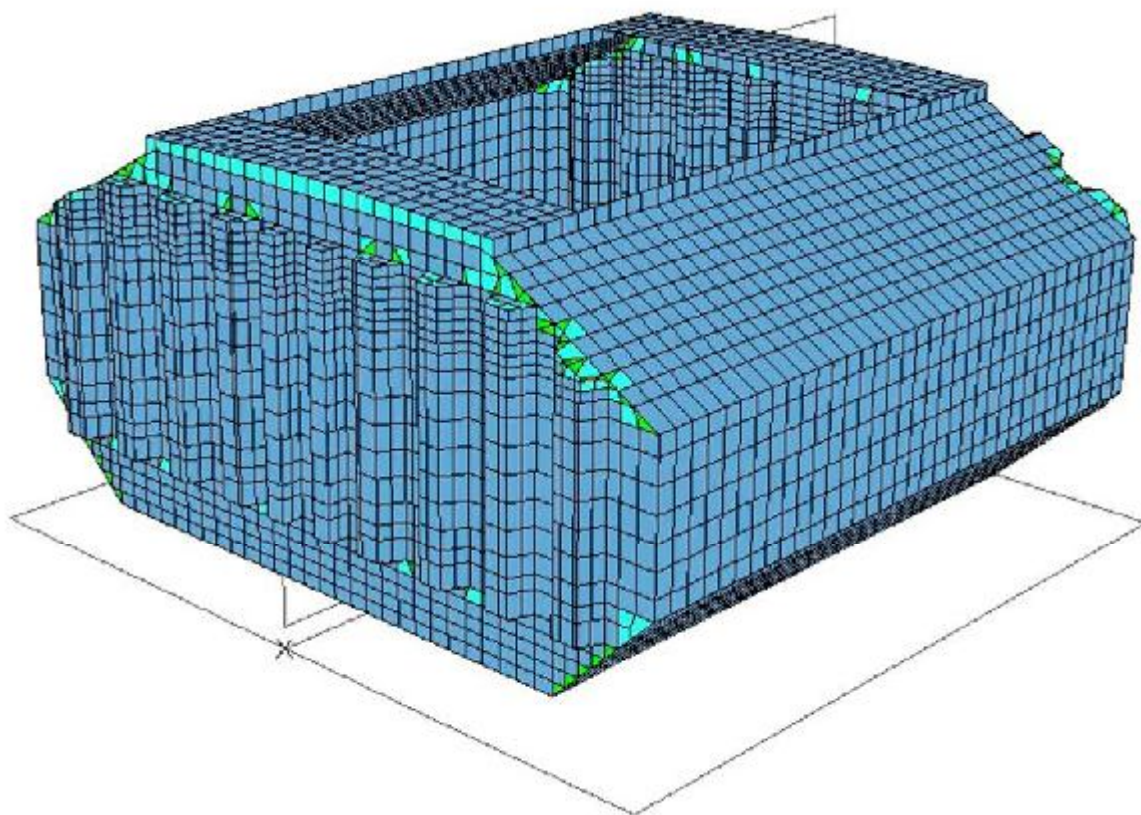


Slika 14. Karakteristični segment teretnog prostora

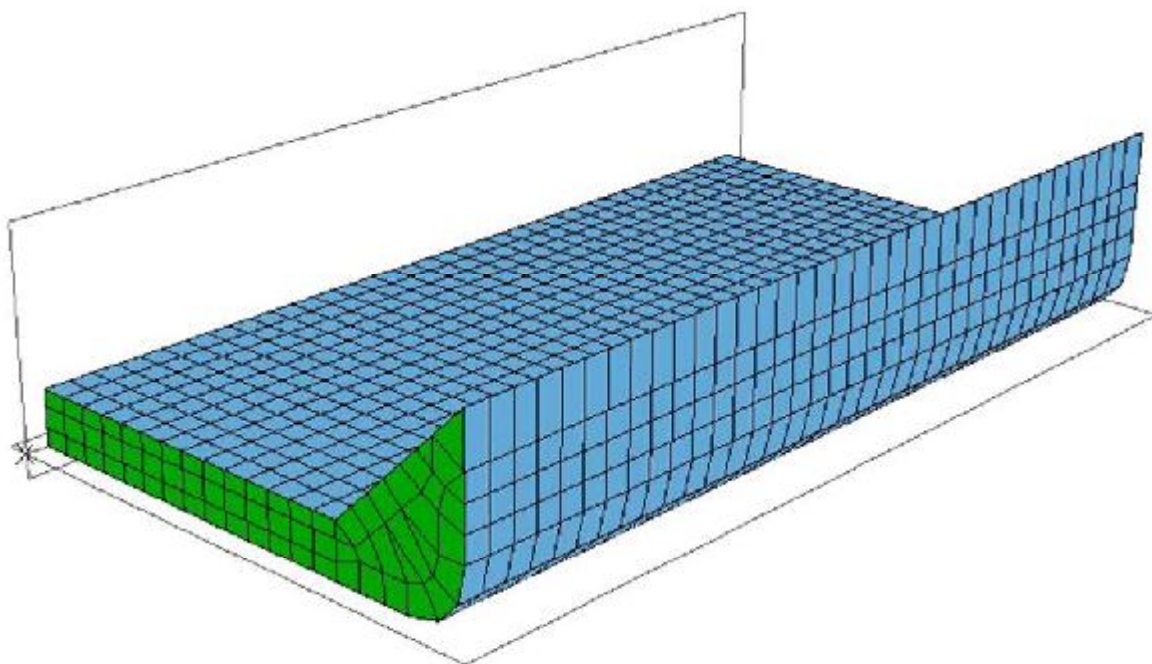
3.2. Priprema modela za implementaciju opterećenja

Osnivanje volumena, koji su sastavni dijelovi modela i njih punimo teretom ili balastom ovisno o njihovoj namjeni. Na brodu se osim glavnih skladišnih prostora nalaze i tankovi za balast i oni se nalaze u dvodnu, uzvoju ili pod palubom. Puneći tankove i skladišne prostore simuliramo stvarna opterećenja koja će brod doživjeti tijekom eksploatacije.

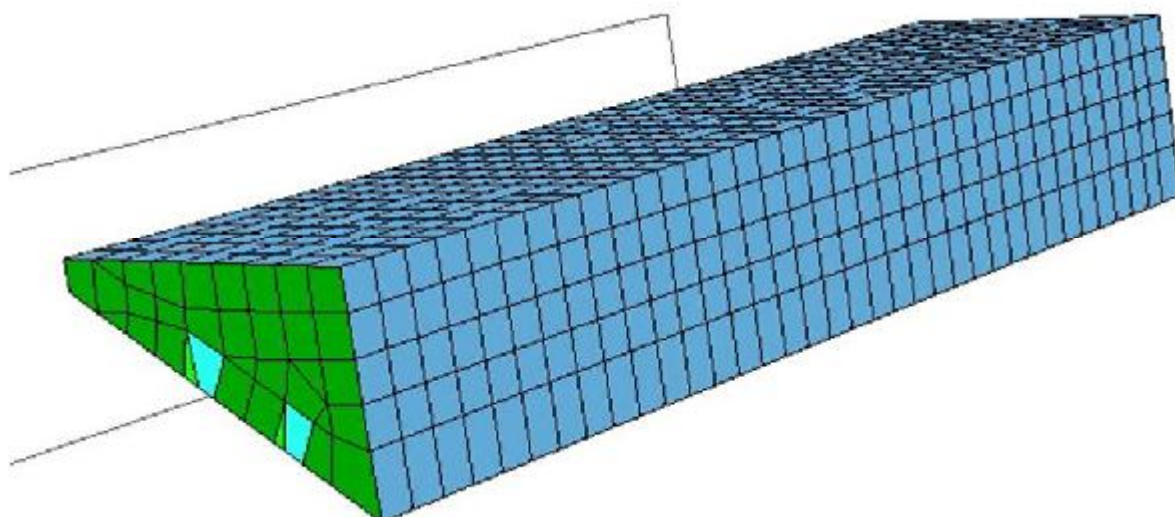
Međutim nisu sva skladišta i tankovi napunjeni istovremeno istim teretom i istom količinom. To je određeno stanjima krcanja koja će biti objašnjena u poglavlju 4.



Slika 15. Skladišni prostor



Slika 16. Donji uzvojni tank

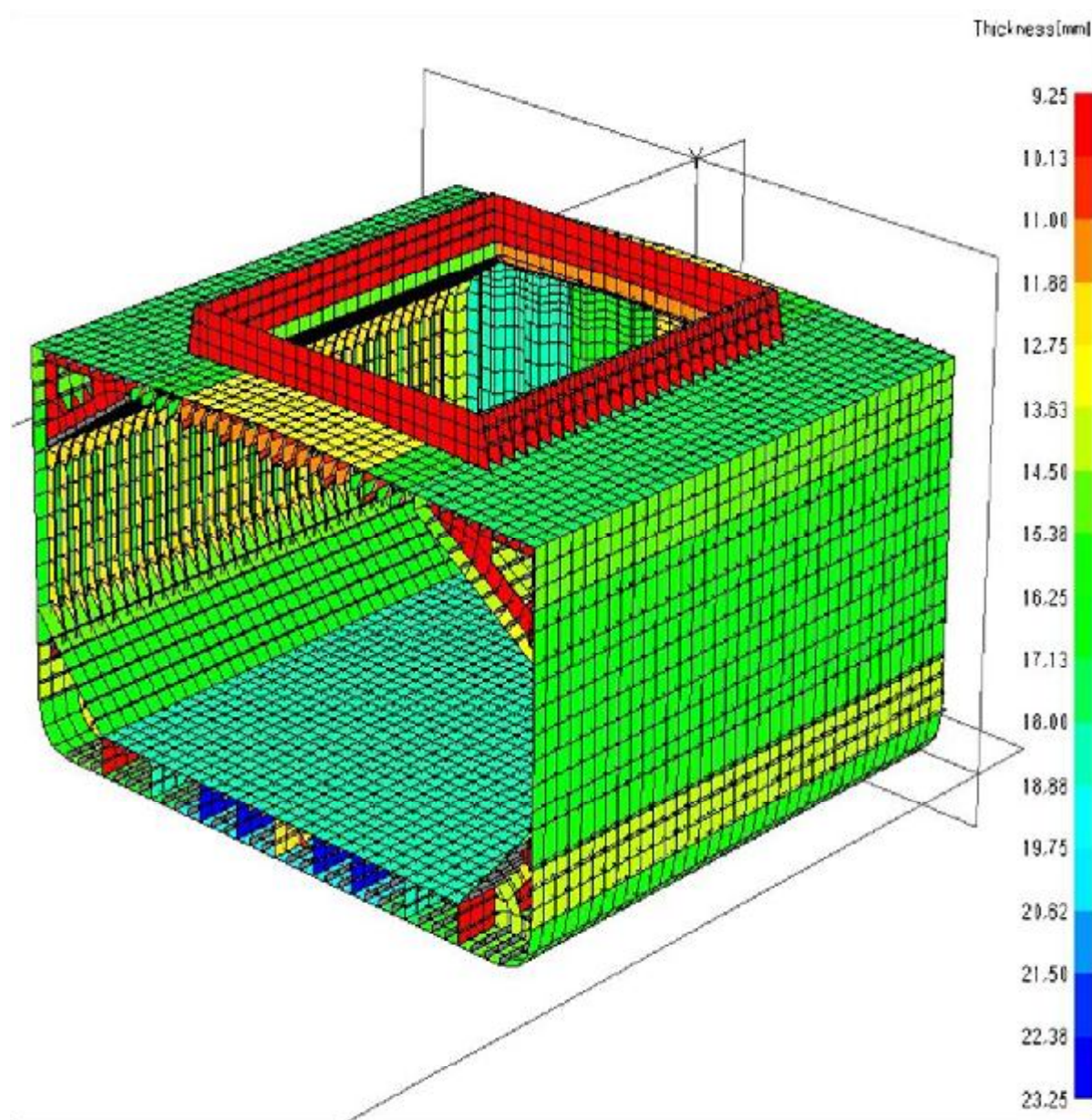


Slika 17. Gornji uzvojni tank

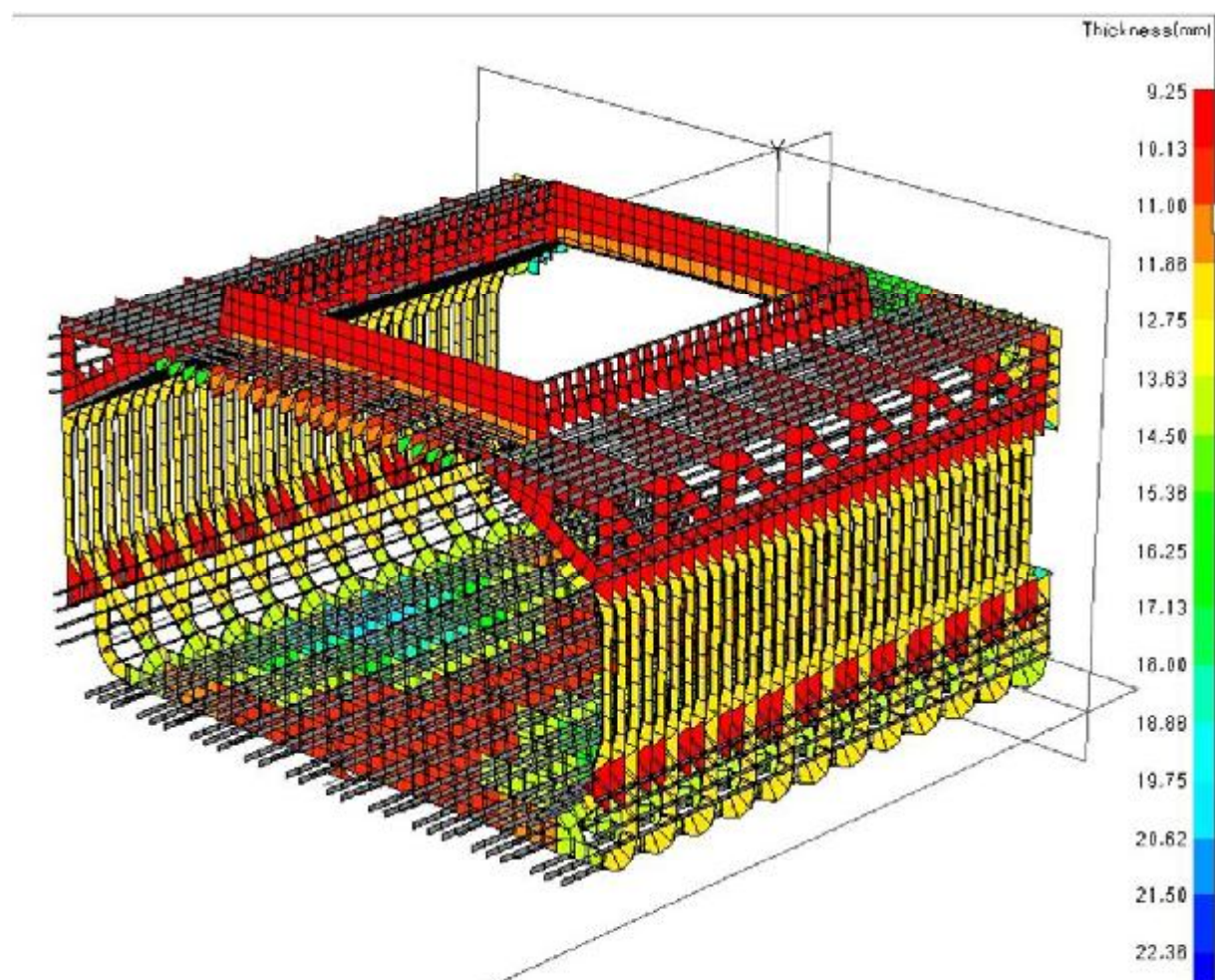
3.3. Korozija

Odbitak zbog korozije je korišten pri modeliranju, u skladu s IACS pravilima. Korozijski odbitak od $0.5t_c$ korišten je za proračun odziva, a t_c za proračun izvijanja.

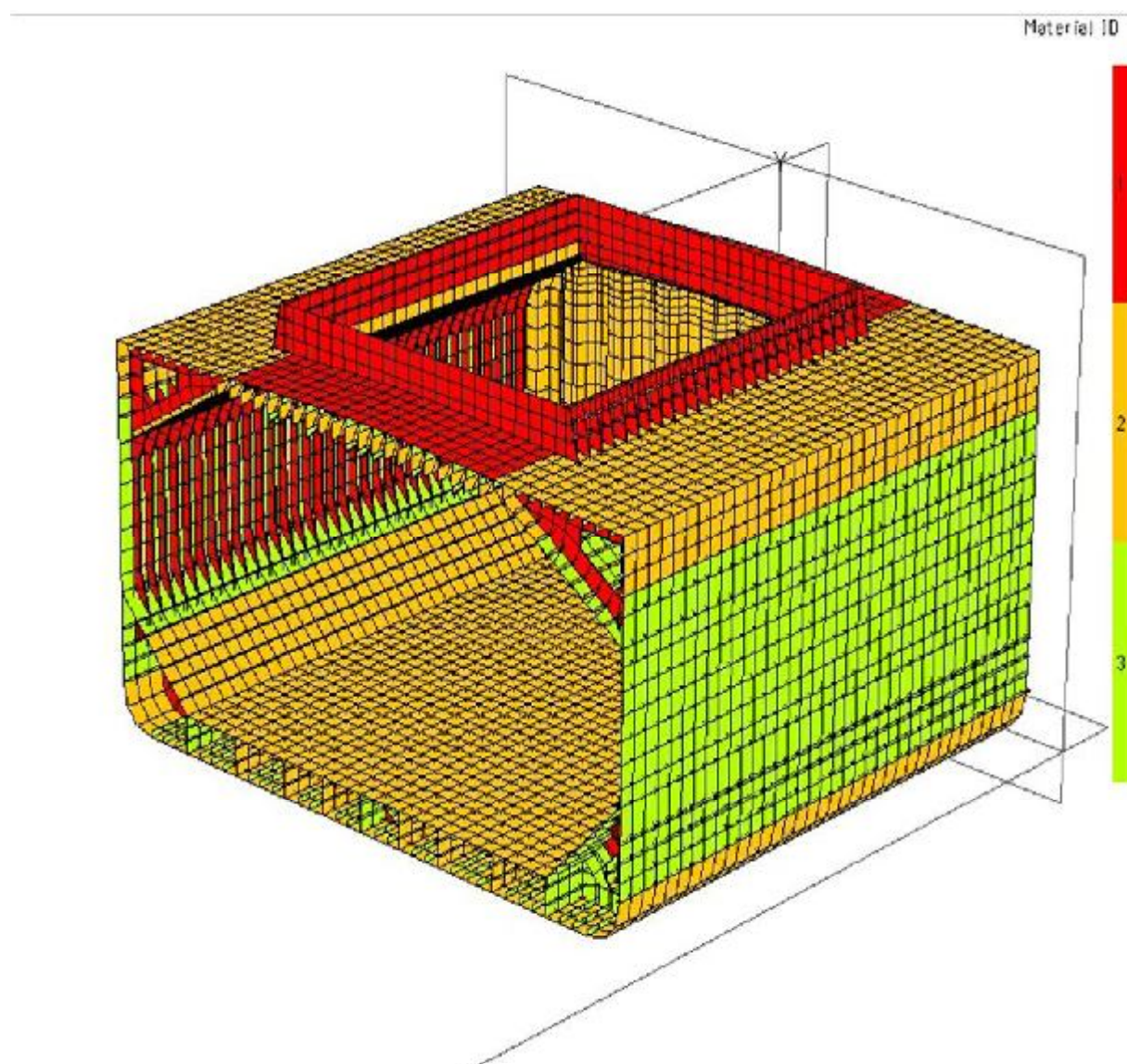
S obzirom na taj odbitak zbog korozije vršit će se i svi daljnji proračuni.



Slika 18. Debljine materijala



Slika 19. Debljine materijala poprečne strukture



Slika 20. Vrste čelika korištenih za izradu modela

U projektnoj dokumentaciji dano je da su se za gradnju broda koristile tri vrste čelika:

- ST 24 - obični brodograđevni čelik $E=2.04 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ i $\sigma_{\text{dop}}=235 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow 1$ (vidi sliku 20)
- AH 36 - čelik povišene čvrstoće $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ i $\sigma_{\text{dop}}=355 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow 2$ (vidi sliku 20)
- AH 32 - čelik povišene čvrstoće $E=2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ i $\sigma_{\text{dop}}=315 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow 3$ (vidi sliku 20)

Odbitak zbog korozije definiran je tablicom:

Tablica 2. Korozijski odbitak

Korozijski odbitak oplave						
<i>Gruppa</i>	<i>Zona</i>	<i>Opis</i>	t_{c1}	t_{c2}	t_c	$t_c/2$
Dno i uzvoji	1	Oplata dna i uzvoja izložena moru i balastu	1,0	1,2	3,0	1,5
Primarni noseći elementi (girderi i rebrenice)	1	Oplata girdera i rebrenica u dvodnu izložena balastu	1,5	-	3,5	1,75
Primarni noseći elementi (okviri)	1	Dijelovi rebara udaljenija više od 3m od vrha tanka	1,5	-	3,5	1,75
	2	Dijelovi rebara udaljena do 3 m od vrha tanka	2,0	-	4,5	2,25
Pokrov dvodna	1	Oplata pokrova dvodna	1,2	3,7	6,0	3,0
Oplata uzvojnog tanka (Izložena suhom rasutom teretu)	1	Oplata udaljenija više od 3m od vrha tanka	1,2	3,7	5,5	2,75
	2	Oplata udaljena do 3m od vrha tanka	1,7	3,7	6,0	3,0
Bok (Izložen moru)	1	Oplata boka izložena moru i balastu udaljenija više od 3m od vrha tanka	1,0	1,2	3,0	1,5
	2	Oplata boka izložena moru i balastu udaljena do 3m od vrha tanka	1,0	1,7	3,5	1,75
	3	Oplata boka izložena suhom rasutom teretu i moru koja se nalazi između gaza u stanju balasta i balasta prototipa	1,5	2,0	4,0	2,0
Oplata wing tanka (Izložena suhom rasutom teretu)	1	Oplata udaljenija više od 3m od vrha tanka	1,2	1,8	3,5	1,75
	2	Oplata udaljena do 3m od vrha tanka	1,7	1,8	4,0	2,0
Paluba	1	Dijelovi palube izloženi atmosferi	1,7	1,7	4,0	2,0
Otvori	1	Pražnica grota izložena atmosferi	1,0	-	2,5	1,25

Tablica 2. Korozijski odbitak

Korozijski odbitak oplata						
Groupa	Zona	Opis	t_{C1}	t_{C2}	t_C	$t_C/2$
Poprečna pregrada	1	Centralni dijelovi pregrade	3,0	-	6,5	3,25
	2	Gornji dijelovi pregrade	2,0	-	5,5	2,75
Poprečna pregrada (prazni prostori)	1	Dijelovi izloženi teretu i prazni prostori	3,0	1,7	4,5	2,25
Donja stula	1	Dijelovi izloženi suhom rasutom teretom i prazni prostori	5,2	0,7	6,5	3,25
	2	Prazni prostori u donjoj stuli	0,7	-	2,0	1,0
Gornja stula	1	Dijelovi izloženi suhom rasutom teretom i prazni prostori	2,4	0,7	4,0	2,0
	2	Prazni prostori u gornjoj stuli	0,7	-	2,0	1,0
Ukrepe i koljena (teretni prostor)	1	Rebra i koljena gornjih dijelova boka	1,8	-	4,5	2,25
	2	Rebra i pojasevi bočnih okvira	2,0	-	4,5	2,25
	3	Rebra i pojasevi koljena okvira boka	2,2	-	5,0	2,5

Korozijski odbitak ukrepa				
Zona	Opis	t_{C1}	t_C	$t_C/2$
1	Ukrepe u balastnom tanku (dvodno, donji dijelovi uzvojnog i wing tanka)	1,2	3,0	1,5
2	Ukrepe u balastnom tanku udaljena do 5m od vrha tanka (gornji dijelovi uzvojnog i wing tanka)	1,7	4,0	2,0
3	Prednja strana oplata primarnih elemenata (pojasevi oko rupa u okvirima uzvojnog i wing tanka)	2,0	4,5	2,0
4	Ukrepe u teretnom prostoru	2,0	4,5	2,25
5	Rebra i pojasevi donjih dijelova okvira boka	2,2	5,0	2,5
6	Ukrepe otvora	1,0	2,5	1,25
7	Ukrepe u praznim prostorima	0,7	2,0	1,0

4. DEFINICIJA I IMPLEMENTACIJA OPTEREĆENJA

4.1. Uvod

U prijašnjim poglavljima opisana su IACS pravila, način na koji je izrađen MKE model koji će biti korišten u proračunu. Ovo poglavlje se bavi procedurama kojima smo dobili opterećenja za *3-hold* model iz *Maestro*. Već je prije spomenuto da će se navedeni program koristiti i za provođenje proračuna. Zadatak proračuna, odnosno strukturne analize određivanje strukturnog odziva (naprezanja i deformacija) promatranog modela pod zadanim opterećenjima. U ovom slučaju opterećenja su kombinacija valne komponente i stanja krcanja.

Valne komponente i njihove definicije dane su tablicom:

Tablica 3. Definicija slučajeva opterećenja [1]

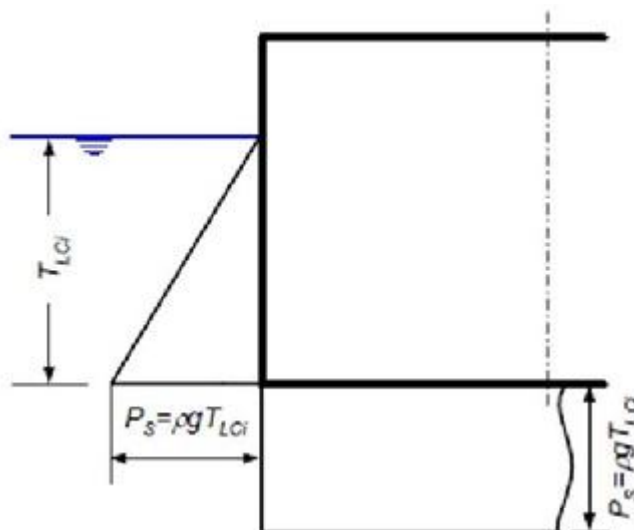
Load case	H1	H2	F1	F2	R1	R2	P1	P2
EDW	"H"		"F"		"R"		"P"	
Heading	Head		Follow		Beam (Port: weather side)		Beam (Port: weather side)	
Effect	Max. Bending Moment		Max. Bending Moment		Max. Roll		Max. Ext. Pressure	
	Sagging	Hogging	Sagging	Hogging	(+)	(-)	(+)	(-)

Stanja krcanja dobivena su iz Knjige trima i stabiliteta [6] za brod napravljen u Brodosplitu, prema čijem nacrtu glavnog rebra je izrađen model iz ovog rada. Na temelju podataka iz knjige trima i stabiliteta te pravila IACS-a identificirano je devetnaest slučajeva opterećenja koja su dana u **Tablici 4**. Slučajevi opterećenja razlikuju se po načinu krcanja, zbog različite gustoće tereta, broju popunjenih skladišta i postotku njihove popunjenosti.

4.2. Komponente opterećenja [1]

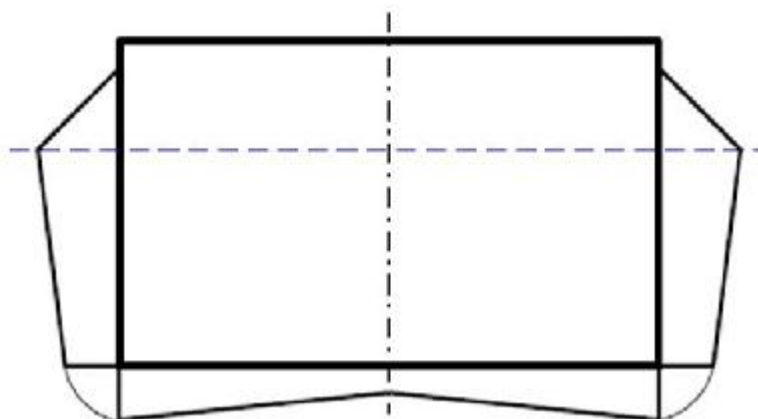
4.2.1. Vanjski tlakovi posljedica su statičkog opterećenja mora na vanjsku oplatu broda

- hidrostatski tlak je na bilo kojoj točki vanjske oplate ovisan o gazu na mirnoj vodi



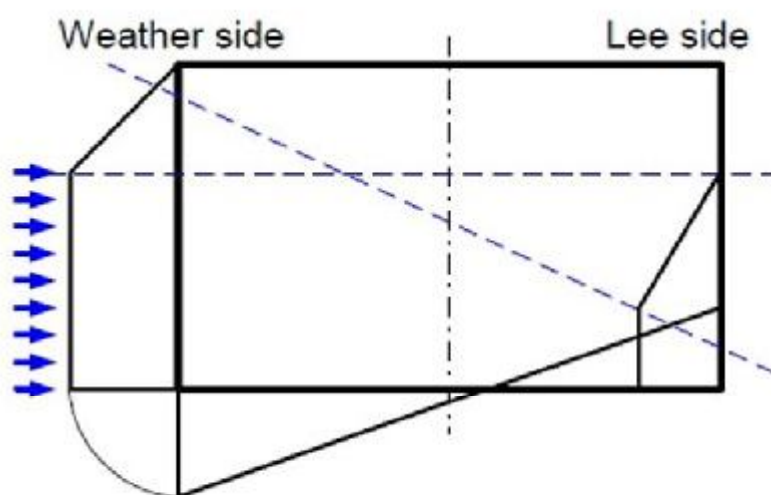
Slika 21. Hidrostatski tlak

- hidrodinamički tlak za slučajeve opterećenja H1, H2, F1 i F2



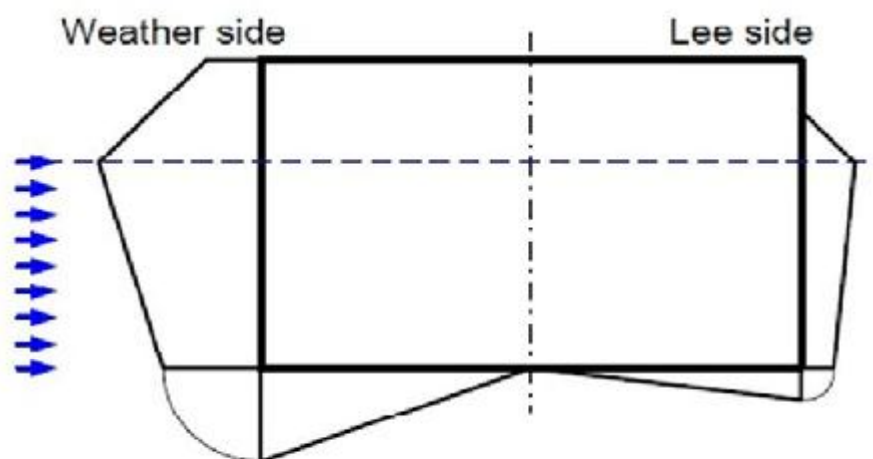
Slika 22. Hidrodinamički tlak za H1, H2, F1 i F2

- hidrodinamički tlak za slučajeve R1 i R2



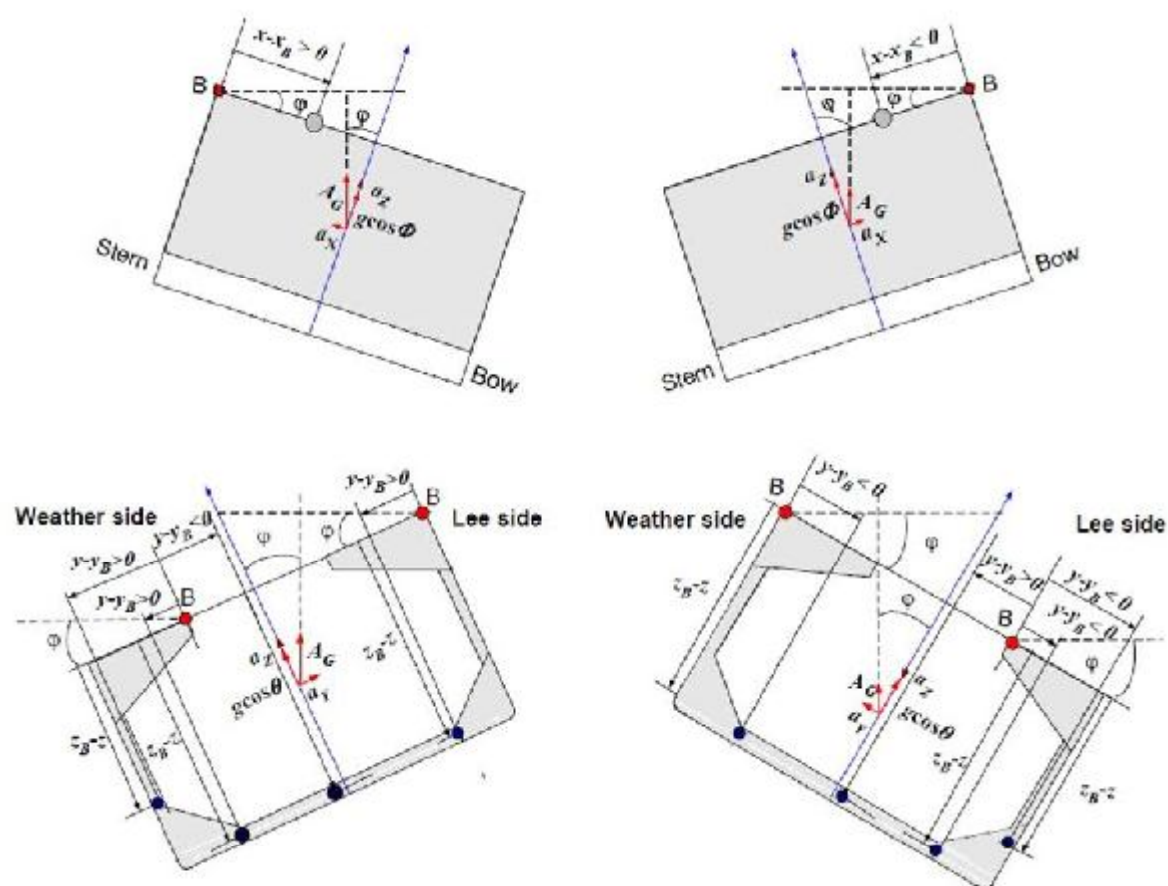
Slika 23. Hidrodinamički tlak za R1 i R2

- hidrodinamički tlak za slučajeve P1 i P2



Slika 24. Hidrodinamički tlak za P1 i P2

4.2.2. Unutarnji tlakovi



Slika 25. Unutarnji tlakovi

4.3. Opterećenja

Vanjski hidrostatički tlak i unutarnji statički tlak koji su nastali zbog tereta i balasta smatraju se kao poprečna opterećenja na mirnoj vodi. Vanjski hidrodinamički tlak i unutarnji inercijski tlak tereta i balasta čine poprečna opterećenja na valovima. Smična sila i moment savijanja na mirnoj vodi, odnosno smična sila i moment savijanja na valovima uzimaju se kao opterećenja konstrukcije trupa. Naprezanje nastalo zbog poprečnog opterećenja na valovima i opterećenje trupa međusobno se kombiniraju pomoću kombinacijskih faktora.

Tablica 4. Kombinacijski faktori opterećenja [1]

	LCF	H1	H2	F1	F2	R1	R2	P1	P2
$M_{\pi\pi}$	$C_{\pi\pi}$	-1	1	-1	1	0	0	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$
$Q_{\pi\pi}$	$C_{Q\pi}^{(1)}$	-1	1	-1	1	0	0	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$
$M_{\pi H}$	$C_{\pi H}$	0	0	0	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$	0	0
a_{large}	C_{XS}	-0.8	0.8	0	0	0	0	0	0
$a_{\text{pitch } z}$	C_{XP}	1	-1	0	0	0	0	0	0
$g \sin \Phi$	C_{XS}	1	-1	0	0	0	0	0	0
a_{sway}	C_{YS}	0	0	0	0	0	0	1	-1
$a_{\text{roll } y}$	C_{YR}	0	0	0	0	1	-1	0.3	-0.3
$g \sin \theta$	C_{YG}	0	0	0	0	1	-1	0.3	-0.3
a_{heave}	C_{ZH}	$0.6 \frac{T_{LC}}{T_S}$	$-0.6 \frac{T_{LC}}{T_S}$	0	0	$\frac{\sqrt{L}}{40}$	$-\frac{\sqrt{L}}{40}$	1	-1
$a_{\text{roll } z}$	C_{ZR}	0	0	0	0	1	-1	0.3	-0.3
$a_{\text{pitch } z}$	C_{ZP}	1	-1	0	0	0	0	0	0
(1) The LCF for $C_{Q\pi}$ is only used for the aft part of midship section. The inverse value of it should be used for the forward part of the midship section.									









Tablica 5. Op is slučaja va op terćenja [1]

No.	Description ^{a)}	Draught	Loading Pattern	Aft	Mid	Fore	Load Case (Design Wave)			Remarks
							Still water vertical bending moment ^{b)}			
1	Full Load ([2.1.3])	T_s					P1			MAESTRO LC 1 L. CONDITION 13
							$0.5M_{SW,S}$			
2	Full Load ([3.2.1])	T_s					P1			MAESTRO LC 2 L. CONDITION 7
							$0.5M_{SW,S}$			
3	Slack Load ([3.2.2])	T_s					P1			MAESTRO LC 3 L. CONDITION 7
							0			
4	Deepest Ballast ([3.2.3])	T_{da}					R1	R1	P1	
							$M_{SW,H}$	$M_{SW,S}$	$M_{SW,S}$	
5	Multi Port -2 ([3.3.2])	$0.83T_s$					F2	P1		MAESTRO LC 4.5 L. CONDITION 41
							$M_{SW,H}$	$M_{SW,S}$		
6	Multi Port -3 ([3.3.3])	$0.67T_s$					P1			MAESTRO LC 6 L. CONDITION 43
							$M_{SW,S}$			
7	Multi Port -3 ([3.3.3])	$0.67T_s$					P1			
							$M_{SW,S}$			

Tablica 5. Opis slučajeva opterećenja [1]

No	Description ^{a)}	Draught	Loading Pattern	Aft	Mid	Fore	Load Case (Design Wave)					Remarks
							Still water vertical bending moment ^{b)}					
8	Multi Port -4 ([3.3.4])	0 / 5 T_S					F2	R1	R1	P1	MAESTRO LC 7-10 L. CONDITION 45	
							$M_{SW,H}$	$M_{SW,H}$	$M_{SW,S}$	$M_{SW,S}$		
9	Multi Port -4 ([3.3.4])	0.75 T_S					F2	R1	R1	P1		
							$M_{SW,H}$	$M_{SW,H}$	$M_{SW,S}$	$M_{SW,S}$		
10	Alternate Load ([3.4.2])	T_S					F2	P1			MAESTRO LC 11,12 L. CONDITION 8	
							$M_{SW,H}$	0				
11	Alt-Block Load ([3.4.3])	T_S					H1	F2	P1			
							$M_{SW,S}$	$M_{SW,H}$	$M_{SW,S}$			
12	Alt-Block Load ([3.4.3])	T_S					H1	F2	P1			
							$M_{SW,S}$	$M_{SW,H}$	$M_{SW,S}$			
13	Heavy Ballast ([3.5.1])	$T_{HE} (min)$					H1	R1	R1		MAESTRO LC 13,15 L. CONDITION 51	
							$M_{SW,S}$	0	$M_{SW,S}$			
14	Heavy Ballast	$T_{HE} (min)$					R1	R1			MAESTRO LC 16, 17 L. CONDITION 5	
							0	$M_{SW,S}$				
15	Harbour Condition 1 ([3.6.1])	0.67 T_S					---	---				
							$M_{SW,H}$	$M_{SW,P,S}$				

Tablica 5. Op is slučajeva opterećenja [1]

No.	Description ^{a)}	Draught	Loading Pattern	Aft	Mid	Fore	Load Case (Design Wave)			Remarks (see Table 3 above)
							Still water vertical bending moment ^{b)}			
							Still water shear force			
10SF	Alternate Load ((3.4.2))	T_s					F2		MAESTRO LC 18 L. CONDITION 10	
							$0.8M_{SWH}$			
							Q_{SW}			
13SF	Heavy Ballast ((3.5.1))	$T_{HB(min)}$					H1		MAESTRO LC 19 L. CONDITION 41	
							$0.8M_{SW.S}$			
							Q_{SW}			

4.4. Implementirana opterećenja

Sva stanja krcanja sa detaljnim opisom distribucije tereta i statičkim globalnim opterećenjima (moment savijanja i vertikalne sile) po dužini broda dana su u Knjizi trima i stabiliteta [6]. U **Tablici 7** nalaze devet nama zanimljivih stanja krcanja.

Tablica 6. Podacio stanjima krcanja

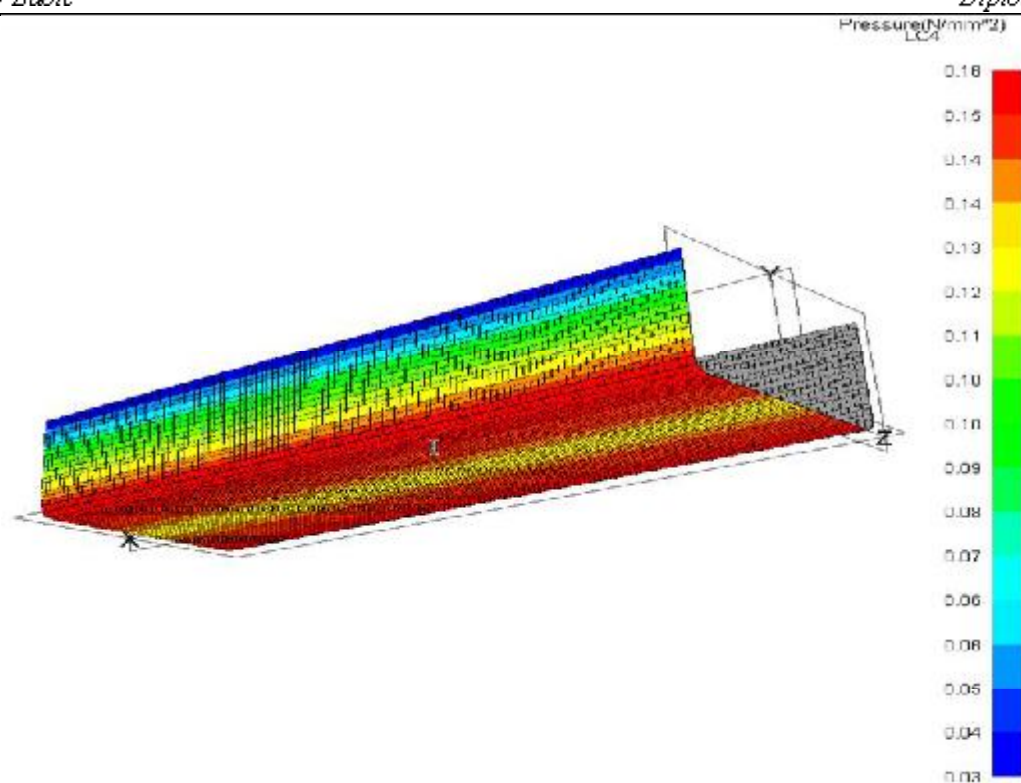
LOADING CONDITIONS	Udaljenost od LPP/2 (m)	M _{STILL WATER} (knjiga trima i stabiliteta)
CONDITION No. 13 – HEAVY CARGO OF 2.4 t/m ³ IN HOLDS 1,2,3,4 AND 5 DRAFT = 12.35 m	-4.52	PROGIB 42864 tm
CONDITION No. 7 – HOMOGENEOUS LOADED +10% STORES DRAFT = 12.35 m	-4.16	PROGIB 37282 tm
CONDITION No. 41 – HOLD 2,4 FULL, 100% STORES DRAFT = 10.25 m (page 53 in T&S book)	40.21	PROGIB 51659 tm
CONDITION No. 43 – HOLD 2,5 EMPTY, 100% STORES DRAFT = 8.27 m	-48.74	PREGIB -78157 tm
CONDITION No. 45 – HOLD 2,3,5 EMPTY, 100% STORES DRAFT = 10.87 m	23.81	PREGIB -94612 tm
CONDITION No. 8 – HEAVY CARGO OF 2.4 t/m ³ IN HOLDS 1,3 AND 5 DRAFT = 12.35 m	40.629	PREGIB -84699 tm
CONDITION No. 51 – HEAVY BALLAST + 10% STORES DRAFT = 7.87 m	11.969	PROGIB 124671 tm
CONDITION No. 5 – HEAVY BALLAST + 10% STORES DRAFT = 7.87 m	11.630	PROGIB 92561 tm
CONDITION No. 10 – HEAVY CARGO OF 2.4 t/m ³ IN HOLDS 1, 3, 5 + 50% STORES DRAFT = 12.37 m	37.304	PREGIB -121 821 tm
CONDITION No. 41 – HEAVY BALLAST + 100% STORES DRAFT = 7.87 m (page 14 in T&S book)	13.02	PROGIB 104561 tm

Od devet odabranih stanja krcanja generirano je devetnaest slučajeva opterećenja prema IACS Pravilima i Tablici n iz 4.1 ovog rada. Statički momenti savijanja za progib i pregib izračunati su prema IACS Pravilima: $M_{sw,hogg} = 1.227 \cdot 10^6$ (kNm); $M_{sw,seg} = 1.11 \cdot 10^6$ (kNm), te su uspoređivani sa onima dobivenim iz knjige trima i stabiliteta. Između navedenih odabrani su veći i kombinirani su sa valnim momentima savijanja prema IACS Pravilima. Zbrojeni tako tvore ukupni moment savijanja i ukupnu smičnu silu za svaki slučaj opterećenja.

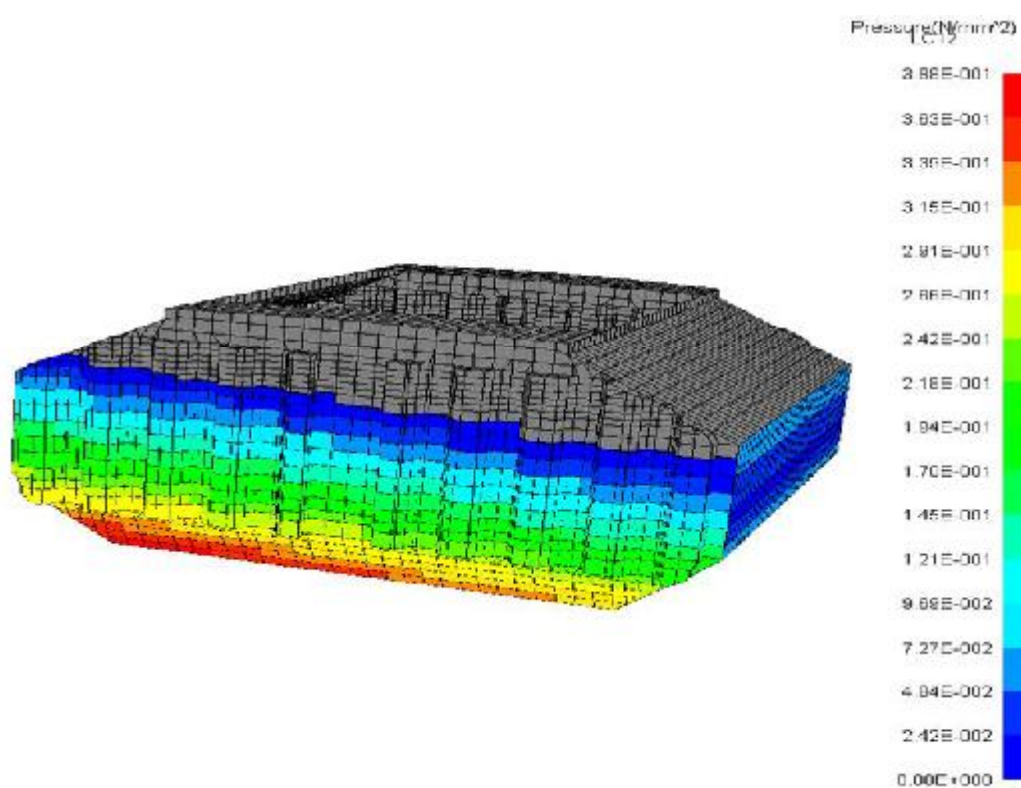
Navedenih devetnaest slučajeva opterećenja implementirani su u Maestru, te su prikazani u **Tablici 8**.

Detaljan proračun, izrađen u MathCadu prema pravilima IACS-a za jedan slučaj opterećenja dan je u Prilogu.

Na slikama 26 i 27 prikazana su opterećenja tlakova mora na oplatu, te tlakova tereta na oplatu skladišta.



Slika 26. Dinamički tlakovi za LC4



Slika 27. Tlakovi tereta za LC12

Tablica 7. Slučajevi opterećenja

LC	LOAD CONDITION	GAZ (m)	DINAMIČKI TLAKOVI I UBRZANJA	UKUPNI VERTIKALNI MOMENT SAVIJANJA (statički + dinamički IACS Pravila) (kNm)	UKUPNA SMIČNA SILA (statička + dinamička IACS) (kN)
LC 1	CONDITION No. 13 HEAVY CARGO 2.4tm ³	12.35	IACS Pravila	PROGIB 1.683·10 ⁶	0.0
LC 2	CONDITION No. 7 HOM. LOADED +10% ST.	12.35	IACS Pravila	PROGIB 1.683·10 ⁶	0.0
LC 3	CONDITION No. 7 AS LC2, HOLD 3.50% ST.	12.35	IACS Pravila	PROGIB 1.128·10 ⁶	0.0
LC 4	CONDITION No. 41 HOLD 2.4 FULL, 100% ST.	10.25	IACS Pravila	PREGIB -2.99·10 ⁶	0.0
LC 5	CONDITION No. 41 HOLD 2.4 FULL, 100% ST.	10.25	IACS Pravila	PROGIB 1.918·10 ⁶	0.0
LC 6	CONDITION No. 43 HOLD 2.5 EMPTY, 100% ST.	8.27	IACS Pravila	PROGIB 1.618·10 ⁶	0.0
LC 7	CONDITION No. 45 H. 2,3,5 EMPTY, 100% ST.	10.87	IACS Pravila	PREGIB -2.990·10 ⁶	0.0
LC 8	CONDITION No. 45 H. 2,3,5 EMPTY, 100% ST.	10.87	IACS Pravila	PREGIB -1.227·10 ⁶	0.0
LC 9	CONDITION No. 45 H. 2,3,5 EMPTY, 100% ST.	10.87	IACS Pravila	PROGIB 1.110·10 ⁶	0.0
LC 10	CONDITION No. 45 H. 2,3,5 EMPTY, 100% ST.	10.87	IACS Pravila	PROGIB 1.727·10 ⁶	0.0
LC 11	CONDITION No. 8 HEAVY 2.4 tm ³ IN 1,3,5	12.35	IACS Pravila	PREGIB -2.990·10 ⁶	0.0
LC 12	CONDITION No. 8 HEAVY 2.4 tm ³ IN 1,3,5	12.35	IACS Pravila	PROGIB 6.977·10 ⁵	0.0
LC 13	CONDITION No. 51 HEAVY BALL. + 10% ST.	7.87	IACS Pravila	PROGIB 2.990·10 ⁶	0.0
LC 14	CONDITION No. 51 HEAVY BALL. + 10% ST.	7.87	IACS Pravila	0.0	0.0
LC 15	CONDITION No. 51 HEAVY BALL. + 10% ST.	7.87	IACS Pravila	PROGIB 1.110·10 ⁶	0.0
LC 16	CONDITION No. 5 HEAVY BALL. + 10% ST.	7.87	IACS Pravila	0.0	0.0
LC 17	CONDITION No. 5 HEAVY BALL. + 10% ST.	7.87	IACS Pravila	PROGIB 1.110·10 ⁶	0.0
LC 18	CONDITION No. 10 HEAVY 2.4 tm ³ IN 1, 3, 5 + 50% STORES	12.37	IACS Pravila	PREGIB -2.127·10 ⁶	-7.89·10 ⁴
LC 19	CONDITION No. 41 HEAVY BALL. + 100% ST.	8.97	IACS Pravila	PROGIB 2.110·10 ⁶	7.65·10 ⁴

4.5. Rubni uvjeti

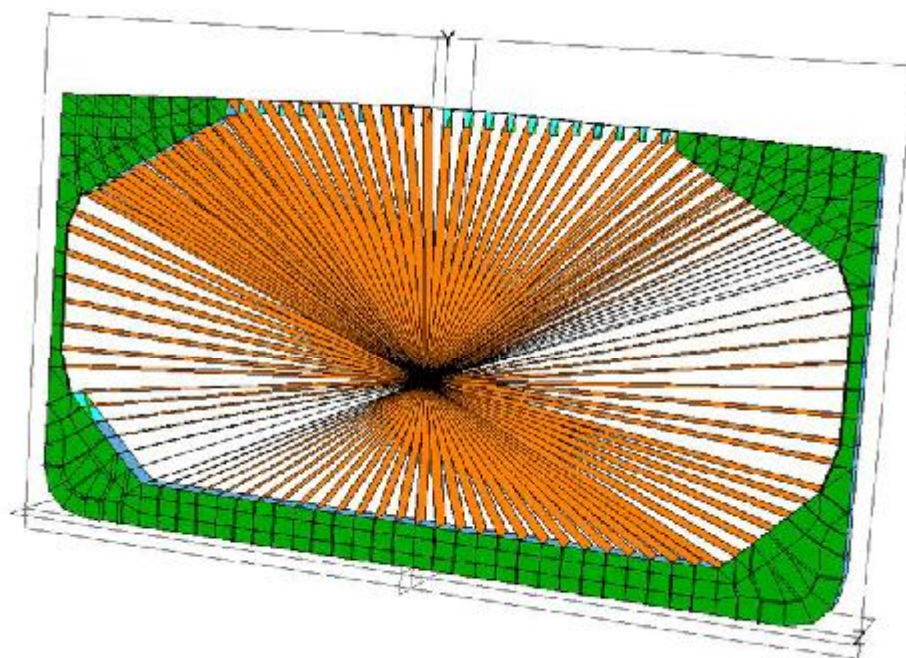
Rubni uvjeti odnose se na granične sekcije koji su modelirani u skladu s IACS pravilima. Čvorovi uzdužnih elemenata na krmenoj i pramčanoj graničnoj sekciji kruto su vezani s točkom koja se nalazi u sjecištu neutralne osi i presjeka CL-a. Tablice 9 i 10 prikazuju kriterije uvjete fiksiranja.

Tablica 8. Kruta veza oba kraja [1]

Nodes on longitudinal members at both ends of the model	Translational			Rotational		
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
All longitudinal members	RL	RL	RL	-	-	-
RL means rigidly linked to the relevant degrees of freedom of the independent point						

Tablica 9. Dozvoljeni pomaci [1]

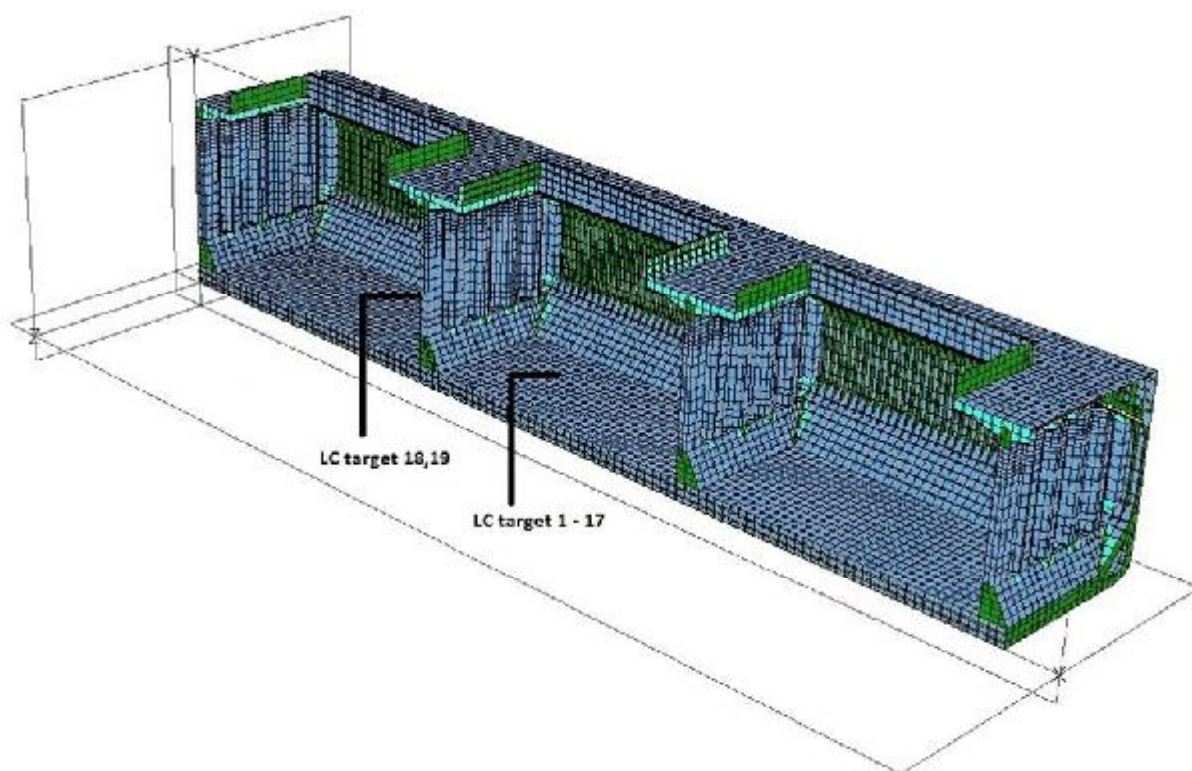
Location of the independent point	Translational			Rotational		
	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
Independent point on aft end of model	-	Fix	Fix	Fix	-	-
Independent point on fore end of model	Fix	Fix	Fix	Fix	-	-



Slika 28. Prsten

4.6. Balansiranje modela

„MathCad“-om izračunate „target“ momente savijanja i smične sile iz **Tablice 8** bilo je potrebno postići na različitim položajima. „Target“ momenti savijanja za slučajeve opterećenja 1 – 17 postizani su na sredini skladišta 3, dok je „target“ smična sila za slučajeve opterećenja 18 i 19 postignuta je na mjestu poprečne naborane pregrade između skladišta 3 i 4.



Slika 29. „Target“ koordinate

Model smo balansirali direktnom metodom.

Smične sile balansirane su prema sljedećim formulama [1]:

$$M_{V_aft_SF} = M_{V_fore_SF} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} [Q_{VT}(x_{eq}) - Q_{VFEM}(x_{eq})]; \text{ za vertikalnu smičnu silu}$$

$$M_{H_aft_SF} = M_{H_fore_SF} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} [Q_{HT}(x_{eq}) - Q_{HFEM}(x_{eq})]; \text{ za horizontalnu smičnu silu}$$

Momenti savijanja balansirani su prema sljedećim formulama [1]:

$$M_{V_aft_BM} = M_{V_fore_BM} = - \left[M_{VT}(x_{eq}) - M_{VFEM}(x_{eq}) - M_{V_aft_SF} 2 \left(\frac{x_{eq} - x_{aft}}{x_{fore} - x_{aft}} \right) - 1 \right] \quad ; \text{ za vertikalni moment}$$

$$M_{H_aft_BM} = M_{H_fore_BM} = - \left[M_{HT}(x_{eq}) - M_{HFEM}(x_{eq}) - M_{H_aft_SF} 2 \left(\frac{x_{eq} - x_{aft}}{x_{fore} - x_{aft}} \right) - 1 \right] \quad ; \text{ za horizontalni moment}$$

gdje su:

$M_{V_aft_SF}, M_{V_fore_SF}$ - vertikalni momenti smične sile [kNm]

x_{fore}, x_{aft} - udaljenost rubnog uvjeta [m]

Q_{VT}, Q_{VFEM} - vertikalne smične sile dobivene proračunom [N]

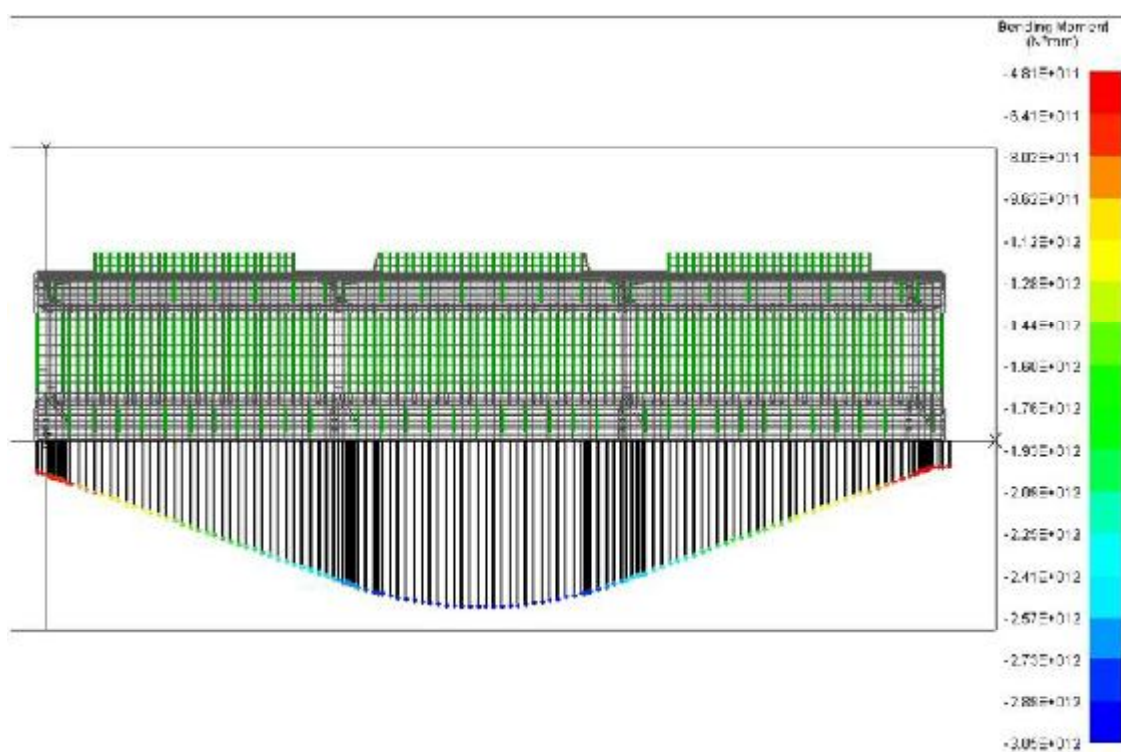
$M_{H_aft_SF}, M_{H_fore_SF}$ - horizontalni momenti smične sile [kNm]

Q_{HT}, Q_{HFEM} - horizontalne smične sile [N]

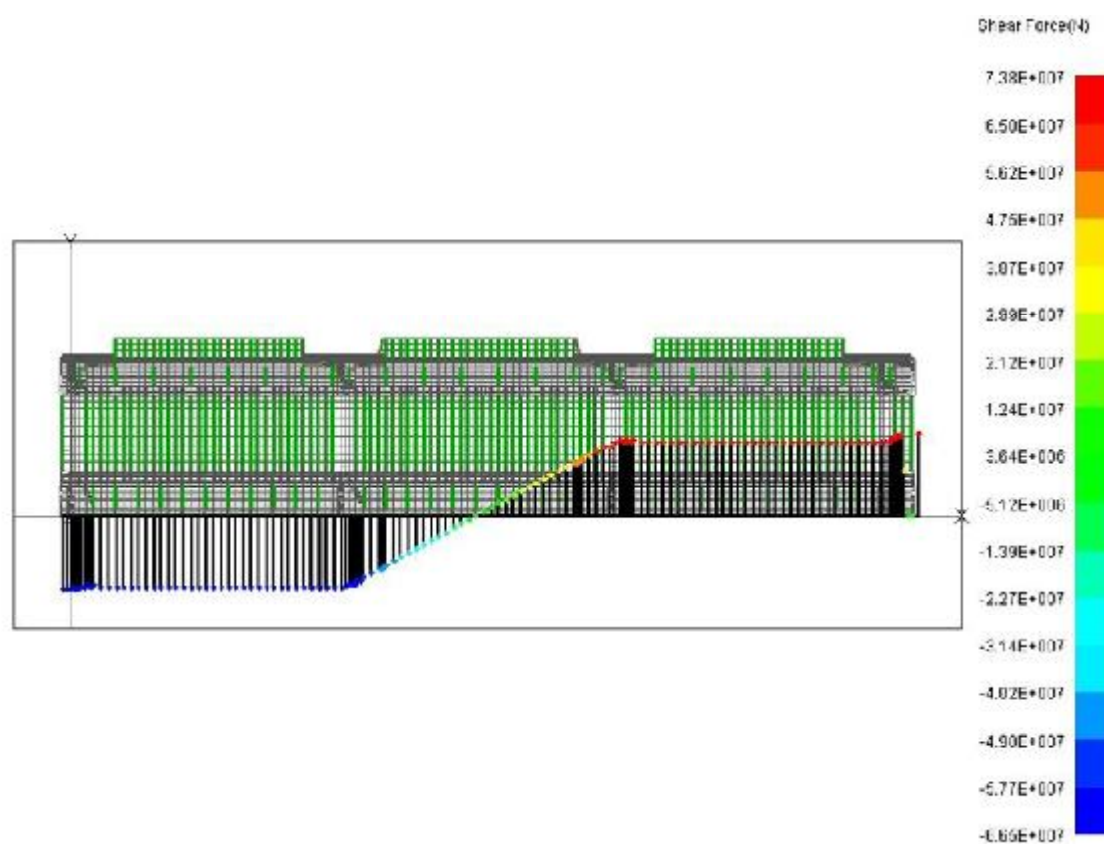
$M_{V_aft_BM}, M_{V_fore_BM}, M_{VT}, M_{VFEM}$ - vertikalni momenti savijanja [kNm]

$M_{H_aft_BM}, M_{H_fore_BM}, M_{HT}, M_{HFEM}$ - horizontalni momenti savijanja [kNm]

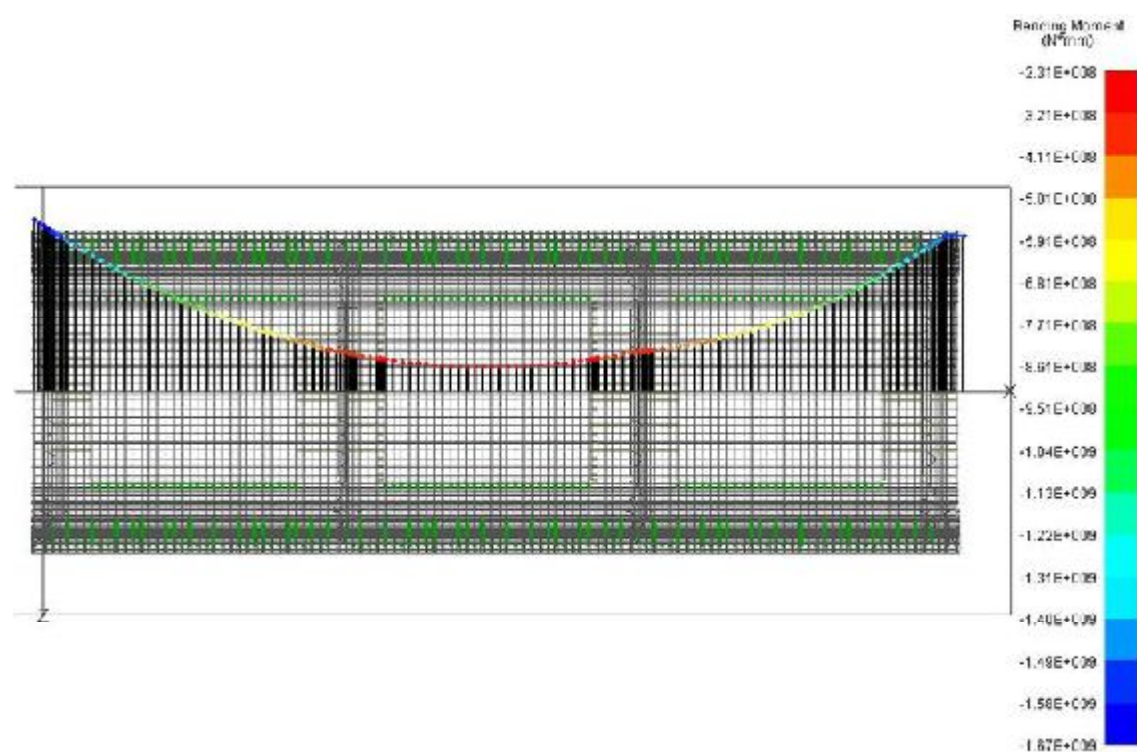
Na sljedećim slikama (30-33) prikazani su dijagrami vertikalnih i horizontalnih momenata savijanja, kao i vertikalnih i horizontalnih smičnih sila. Dijagrami se odnose na slučaj opterećenja 4, LC4. Na sredini dijagrama postignute su vrijednosti propisane IACS Pravilima i prikazane su **Tablicom 8**.



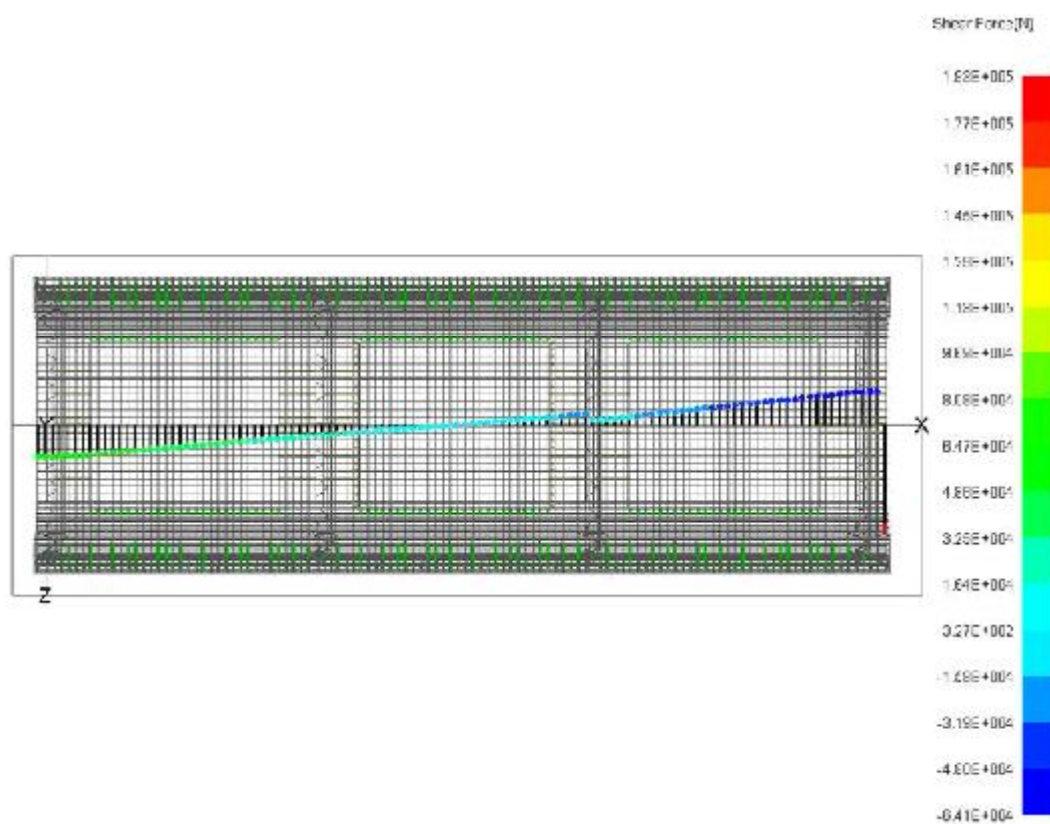
Slika 30. Vertikalni moment savijanja



Slika 31. Vertikalna smična sila



Slika 32. Horizontalni moment savijanja



Slika 33. Horizontalna smična sila

4.7. Rezultati primarne čvrstoće

Programom „Maestro“ su dobiveni rezultati za dva modela. Prvi je model koji je služio kao prototip i odgovara brodu koji je identičan onom iz nacrtu tehničke dokumentacije. Na drugom modelu su izvedeni prepravci konstrukcije u smislu podebljanja oplata na kritičnim mjestima, te postavljanja koljena i ukrepa. Stoga su ovdje prikazani rezultati primarne čvrstoće za oba modela kako bi se i oni mogli uzeti u razmatranje te kako bi se na temelju toga mogli donijeti zaključci o tome koliko navedeni zahvati na konstrukciji broda utječu na primarnu čvrstoću.

Proračunom su dobivene vrijednosti momenta inercije I_{zz} i položaja neutralne linije poprečnog presjeka broda η . S tim podacima mogu se dobiti vrijednosti momenta otpora W . Moment otpora izračunat je na tri različita karakteristična položaja na presjeku broda: dnu, vrhu palube te na vrh boka. Ukupni moment savijanja uzet je za najkritičniji slučaj opterećenja $LC4 M_{TOT} = 2.99 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}$.

Tablica 10. Odnos rezultata primarne čvrstoće za brod Prototip i brod Prijedlog

		Prototip	Prijedlog
I_{zz}	(mm^4)	1.387×10^{14}	1.44×10^{14}
η	(mm)	6596	6353
W_{dno}	(mm^3)	2.10×10^{10}	2.267×10^{10}
$W_{\text{vrh boka}}$	(mm^3)	1.32×10^{10}	1.34×10^{10}
$W_{\text{vrh palube}}$	(mm^3)	1.29×10^{10}	1.31×10^{10}
$\sigma_{L \text{ DNO}} = M_{TOT} / W_{DNO}$	(N/mm^2)	142,4	131,9
$\sigma_{L \text{ vrh boka}} = M_{TOT} / W_{\text{vrh boka}}$	(N/mm^2)	226,5	223,1
$\sigma_{L \text{ vrh palube}} = M_{TOT} / W_{\text{vrh palube}}$	(N/mm^2)	231,8	228,2
A	(mm^2)	2.95×10^6	3.09×10^6

Iz rezultata prikazanih tablicom možemo zaključiti da zahvati u smislu podebljanja oplata, postavljanja ukrepa i koljena na brodu Prijedlog nisu značajnije utjecala na primarnu čvrstoću broda.

5. ANALIZA PODOBNOSTI KONSTRUKCIJE

Analiza se vrši na razini centralnog skladišta. Zadatak strukturne analize podobnosti je na temelju odziva naprezanja i deformacija dobivenih proračunom identificirati elemente strukture koji neće moći izdržati nametnuta im opterećenja. Zapravo se ispituje podobnost dimenzija strukture. Mjerilo podobnosti je faktor podobnosti, koji se proračunava na način:

$$g = \frac{C - \gamma D}{C + \gamma D} \quad \text{gdje je:}$$

g - faktor podobnosti $-1 \leq g \leq 1$

C - izdržljivost (Capability)

D - naprezanje (Demand)

γ - koeficijent sigurnosti – 1

U slučaju da pojedini element nije sposoban podnijeti opterećenja faktor podobnosti će biti $g < 0$. „Maestro“ na isti način procjenjuje svaki element konstrukcije. Bitno je i znati po kojem kriteriju element nije zadovoljio propisane zahtjeve, jer će se tako kvalitetnije moći vršiti ispravke na modelu.

Postoje dva načina klasifikacije zatajenja strukture, to su kolaps strukture i neuporabivost. Kolaps strukture definiran je kao oštećenje koje je toliko ekstenzivno da predstavlja ozbiljan rizik za sigurnost ljudi i uzrokuje gubitak funkcionalnosti strukture. Najčešći uzrok kolapsa je lom jednog ili više glavnih strukturnih elemenata zbog plastičnih deformacija ili izvijanja. Neuporabivost je definirana kao bilo kakva promjena na strukturi koja narušava njezinu funkciju, međutim ne predstavlja opasnost ljudskoj sigurnosti.

Preporuka IACS Pravila [1] za procjenu čvrstoće na popuštanje je ekvivalentno Von Misesovo naprezanje koje se određuje prema formuli:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 3\tau_{xy}^2} \quad [\text{N/mm}^2] \quad \text{gdje je:}$$

σ_x, σ_y - naprezanje u smjeru x i y u $[\text{N/mm}^2]$

τ_{xy} - smično naprezanje u $[\text{N/mm}^2]$

Dozvoljeno naprezanje ne smije prelaziti $235/k \text{ N/mm}^2$, gdje je k faktor materijala i ovisi o ugrađenom materijalu. Za obični brodograđevni čelik ST24 $k = 1$, za čelik povišene čvrstoće AH32 $k = 0.78$, a za AH36 $k = 0.72$.

U ovom radu su korišteni kriteriji koji su ugrađeni u program Maestro.

Kriteriji su označeni sa četiri slova koja imaju svoje značenje i dani su **Tablicom 12**:

Tablica 11. Označavanje kriterija u „Maestru“ [2]

No.	Limit state	Description
1	PCSF	Panel Collapse – Stiffener Flexure
2	PCCB	Panel Collapse – Combined Buckling
3	PCMY	Panel Collapse – Membrane Yield
4	PCSB	Panel Collapse – Stiffener Buckling
5	PYTF	Panel Yield – Tension Flange
6	PYTP	Panel Yield – Tension Plate
7	PYCF	Panel Yield – Compression Flange
8	PYCP	Panel Yield – Compression Plate
9,10	PSPB	Panel Serviceability – Plate Bending
11	PFLB	Panel Failure – Local Buckling
12	GCT	Girder Collapse Tripping
13	GCCF	Girder Collapse Compression in Flange
14	GCCP	Girder Collapse Compression in Plate
15	GYCF	Girder Yield Compression in Flange
16	GYCP	Girder Yield Compression in Plate
17	GYTF	Girder Yield Tension in Flange
18	GYTP	Girder Yield in Tension in Plate
19-21	FCPH	Frame Collapse, Plastic Hinge
22-24	FYCF	Frame Yield, Compression in Flange
25-27	FYTF	Frame Yield, Tension in Flange
28-30	FYCP	Frame Yield, Compression in Plate
31-33	FYTP	Frame Yield, Tension in Plate

Kriterij izvijanja prema IACS provjeravan je formulom iz Ch. Sec. 3, 324 [1]:

$$\left(\frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x R_{eH}}\right)^{e1} + \left(\frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y R_{eH}}\right)^{e2} - B \left(\frac{\sigma_x \sigma_y S^2}{R_{eH}^2}\right)^{e1} + \left(\frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_z R_{eH}}\right)^{e3} \leq 1.0$$

Dijelovi konstrukcije koji su identificirani kao kritični dodatno su provjereni sa formulama za biaksijalno i smično izvijanje definiranih IACS Pravilima prema gornjoj formuli.

U ovom radu za procjenu podobnosti oplata promatrani su kriteriji od 1-11 iz **Tablice 12**. Svaki od navedenih kriterija ocjenjuje različita naprezanja i njihove kombinacije. Kriteriji GCT, GCCF, GCCP, GYCF, GYCP, GYTF, GYTP se odnose na uzdužnjake i ukrepe koji su modelirani kao gredni konačni elementi.

Dominantni kriteriji podobnosti oplata su:

PCSF – kod ovog kriterija „Maestro“ razmatra tri načina kolapsa panela koji su uzrokovani savijanjem i uzdužnom kompresijom ukrepe;

I način: oštećenje ukrepe uzrokovano kompresijom

II način: oštećenje oplata uzrokovano kompresijom

III način : kombinirano oštećenje ukrepe i oplata (kompresija u oplati i naprezanje u ukrepi)

PCCB razmatra se elastično izvijanje ukrepljenog panela nastalo uslijed uzdužnih, poprečnih, smičnih opterećenja te koristi redukcijski faktor plastificiranja

PFLB promatra se lokalno izvijanje (plastično ili elastično) oplata između ukrepa zbog kombiniranog naprezanja.

PCMY ovim kriterijem se koristi kako bi se provjerilo dali su naprezanja u ravnini panela uzrokovala njegovo popuštanje.

Nakon što su detektirana oštećenja modela tj. nedostatnosti elemenata strukture predlažu se korekcije. One se sastoje od povećanja debljina oplata, ukrepa ili pak postavljanja elemenata koji sprječavaju izvijanje strukture.

5.1. Evidentirana oštećenja

Na temelju dobivenih rezultata i primijenjenih kriterija PCCB, PCSF, PCMY, PFLB uočena su sljedeća oštećenja konstrukcije i prijedlozi poboljšanja konstrukcije te su ona dana **Tablicom 13**.

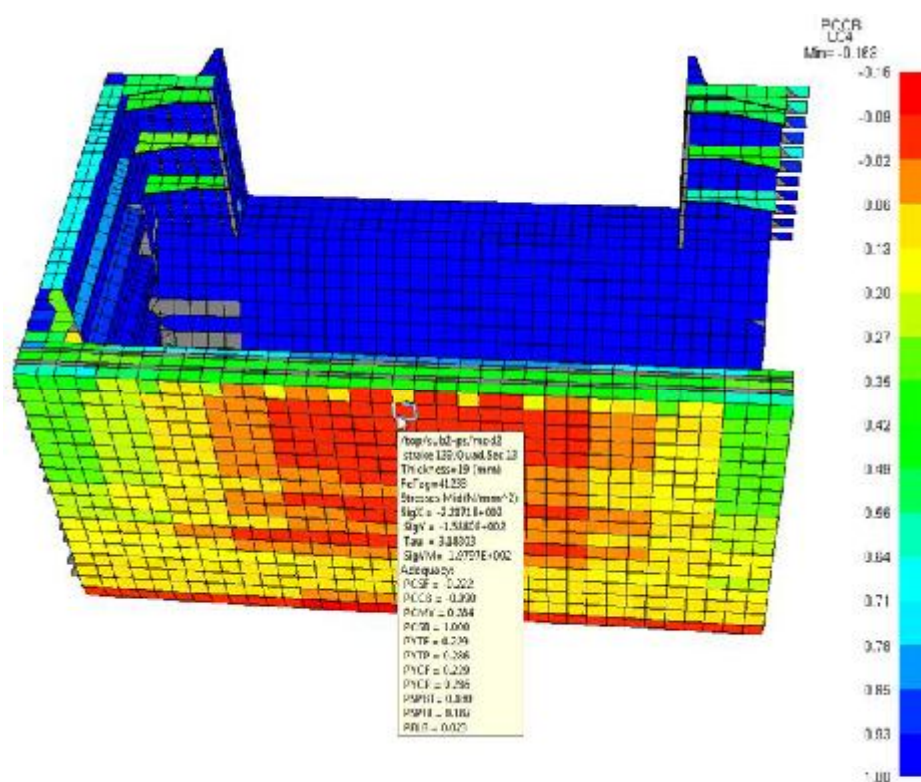
Tablica 12. Oštećenja konstrukcije i prijedlog poplojšanja konstrukcije

STAVKA	Kritična lokacija/Slučaj opterećenja		VRSTA	VRIJEDNOST	KOMENTAR (PROTOTIP)	PREPORUKA		Slika (kriterij #)
	POZICIJA	DIO				LC	Zahvat	
1	Oplate dna	Oplate	σ_x/σ_y PCCB PCSF	-222/-157 -0.09 -0.222	Povećana vjerojatnost izvijanja oplate i ukrepa (Sl. 34,35)	Anti-buckling ukrepe FB 100x10 od rebra 120 do 138 sa razmakom 1222.5 do uzdužnog nosaa 11690 od CL		57 (-0.032)
2			σ_x/σ_y PCCB	-121/-115 0.071				58
3		Rebrelice	$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB	-96/-40/-57 -0.097	Povećana vjerojatnost izvijanja rebrelice (Sl. 36,37,38,39)	Povećanje debljine rebrenica 12→14 mm na rebrima 113,116,143		59
4			$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB PCSF	-70/-52/46 -0.227 -0.199				60
5			$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB	-51/-52/-44 -0.099				61
6			$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB	-16/-77 / 2 -0.159				62
7	Strukture dvodna	Uzdužni nosač na 11690 od CL-a	$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB PCSF	-146/-66/-78 -0.167 -0.167	Povećana vjerojatnost izvijanja i popuštanje uzdužnih nosaa (Sl. 40,41,42,43,44)	Povećanje debljine uzdužnog nosaa na 18 mm između rebara 110-119 i 137-146		63 (-0.158)
8			$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB PCSF	-96/-74/-38 -0.03 -0.068				64
9			$\sigma_x/\sigma_y/t$ PCCB PCSF	-128/-40/90 -0.09 -0.147				65
10		Uzdužni nosač na CL-u	σ_{max} PCSF PCMY	326 -0.147 -0.02	Povećana vjerojatnost izvijanja oplate i ukrepa (Sl. 45)	Povećanje debljine uzdužnog nosaa između rebara 110-119 i 140-146=25mm, između rebara 119-122 i 137-140=16mm, od rebra 122-137=14.5mm Anti-buckling ukrepe FB 100x10 od rebra 120 do 138 sa razmakom 1222.5 do uzdužnog nosaa 5010 od CL		66
11			σ_{max} PCSF PCMY	325 -0.097 -0.016				67
12	Pokrov dvodna	Oplate	σ_x/σ_y PCSF PCCB	-144/-123 -0.098 0.010				68

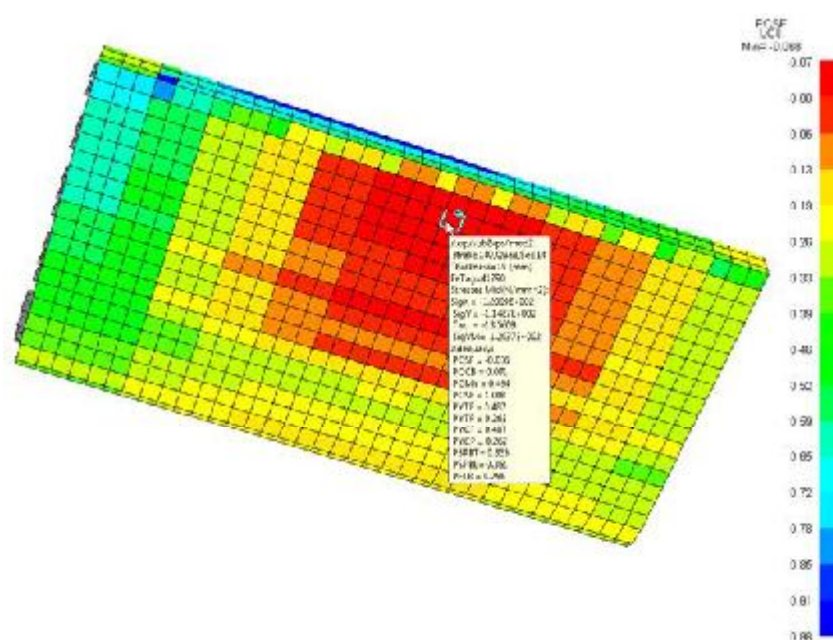
Tablica 12. Oštećenja konstrukcije i priroda poplovljenja konstrukcije

STAVKA	Kritična lokacija/Slučaj opterećenja		VRSTA	VRIJEDNOST	KOMENTAR (PROTOTIP)	PREPORUKA		Slika (kriterij g)	
	POZICIJA	DIO				Zahvat			
13	Uzvojni tank	Oplata	σ_x/σ_y PCSF PCCB	-111/-122 -0.099 -0.012	Povećana vjerojatnost izvijanja oplate (Sl. 46)	Poprečne anti-buckling ukrepe FB 100x10 sa razmakom 835mm		69	
14			Bok	Oplata	σ_x/σ_y PCSF	-85/-80 -0.073	Povećana vjerojatnost izvijanja oplate (Sl. 47,48)	Povećanje debljine oplate boka 18.5→19.5 mm	70
15	LC9	σ_x/σ_y PCSF			-86/-88 -0.152	71			
16	Wing tank	Oplata uz naboranu pregradu	σ_x/σ_y PCCB PCSF	-114/-85 -0.069 -0.187	Povećana vjerojatnost izvijanja oplate i ukrepa (Sl. 50)	Postavljanje poprečnih anti-buckling ukrepa FB 100x10 s razmakom 835 mm na rebrima 110-115 i 130-145		72	
17			LC 1	$\sigma_x/\sigma_y/\tau$ PCCB	-107/-35/-1 -0.082	Povećanja vjerojatnost izvijanja panela (Sl. 51)	Dodana uzdužna ukrepa između uzdužnjaka br. 9 i oplate boka HP 300x13		73
18			LC1	σ_{MMH} PFLB PCMY	311 -0.208 -0.06	Lokalno izvijanje panela u uglu grotla (Sl. 52)	Povećanje debljine panela oko otvora grotla sa 15→17 mm		74 (-0.016)
19	Wing tank	Koljeno između uzdužnjaka 1 i 2 u wing tanku	GCT	-0.323	Povećana vjerojatnost trippinga uzdužnjaka 1 i 2 u wing tanku (Sl. 53)	Postavljeno koljeno 14mm do uzdužnjaka br. 2 sa razmakom 835mm		75	
20			LC14	σ_{MMH} PCMY	356 -0.117	Popuštanje okvira wing tanka (Sl. 54)	Povećanje debljine okvira sa 12→14 mm		76
21	Paluba	Oplata	σ_y PCSF	-122 -0.204	Povećana mogućnost izvijanja dijela oplate između grotlenih otvora (Sl. 55,56)	Povećanje debljine oplate palube 15.5→17.5 mm		77	
22			LC3	PFLB		-0.115	78		
23	Uzdužna pražnica grotla	Oplata	σ_x/σ_y PCCB	-208/-7.7 -0.173	Povećana mogućnost izvijanja oplate (Sl. 57)	Povećanje debljine oplate pražnice grotla sa 12→14mm		79	

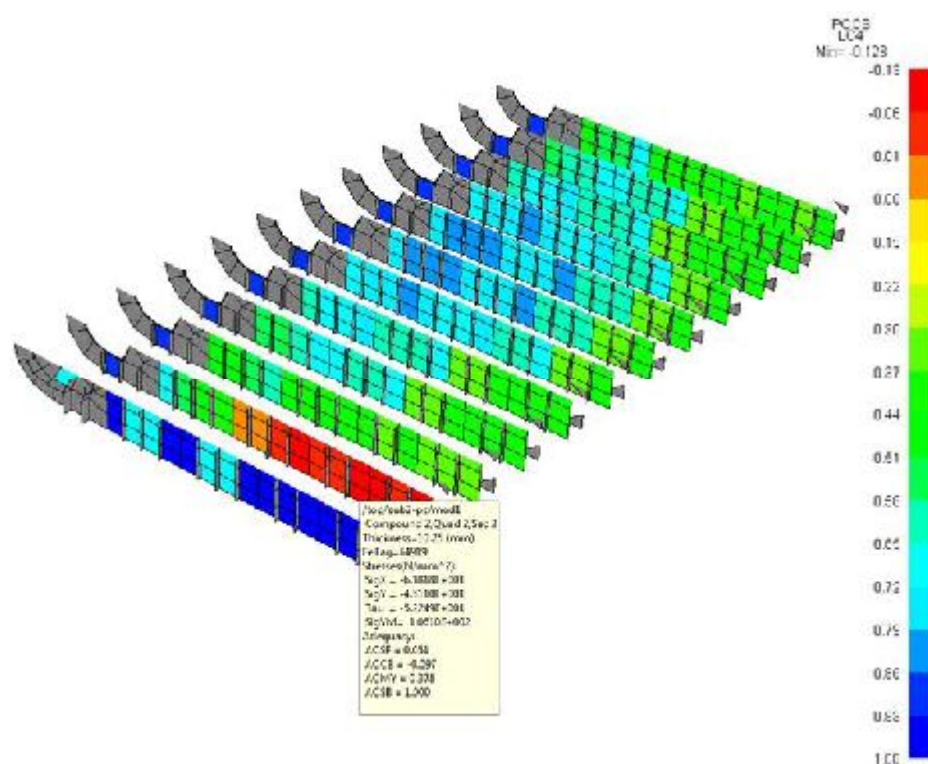
Slike koje slijede prikazuju identificirana mjesta iz **Tablice 13** nakon konstrukcije broda Prototipa kod kojih je došlo do izvijanja, popuštanja ili kombinacije ovih dvaju vrsta oštećenja.



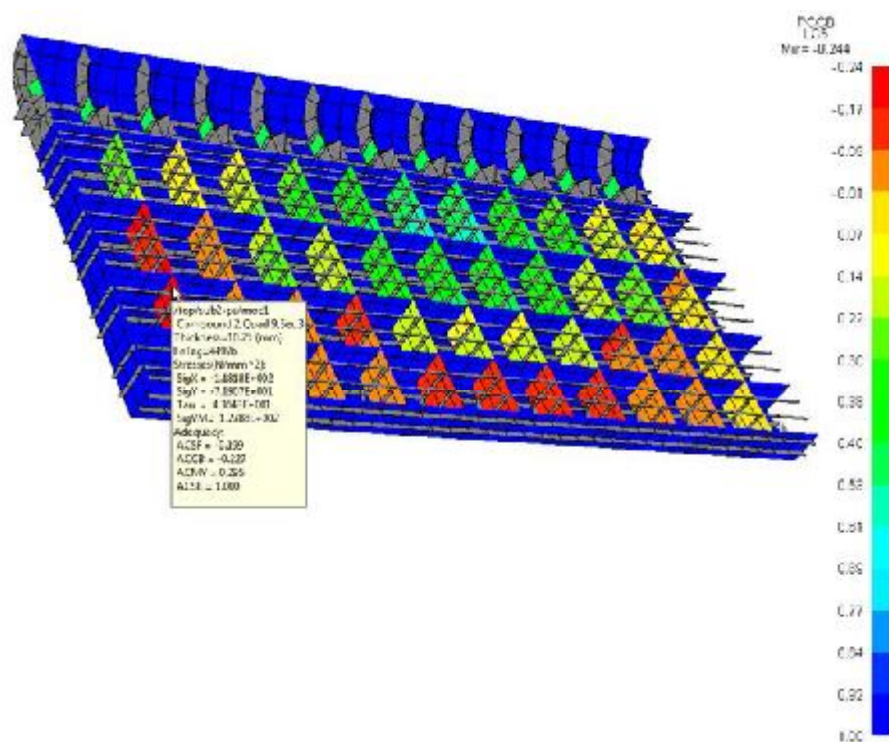
Slika 34. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate dna u LC4 sa kriterijem PCCB



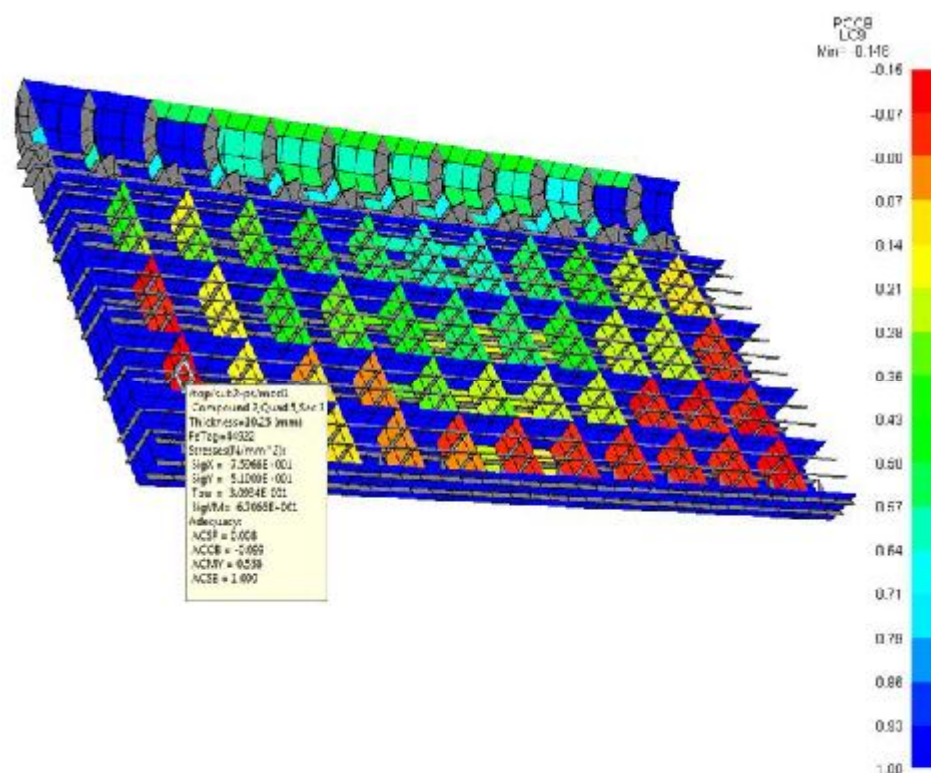
Slika 35. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate dna u LC8 sa kriterijem PCSF



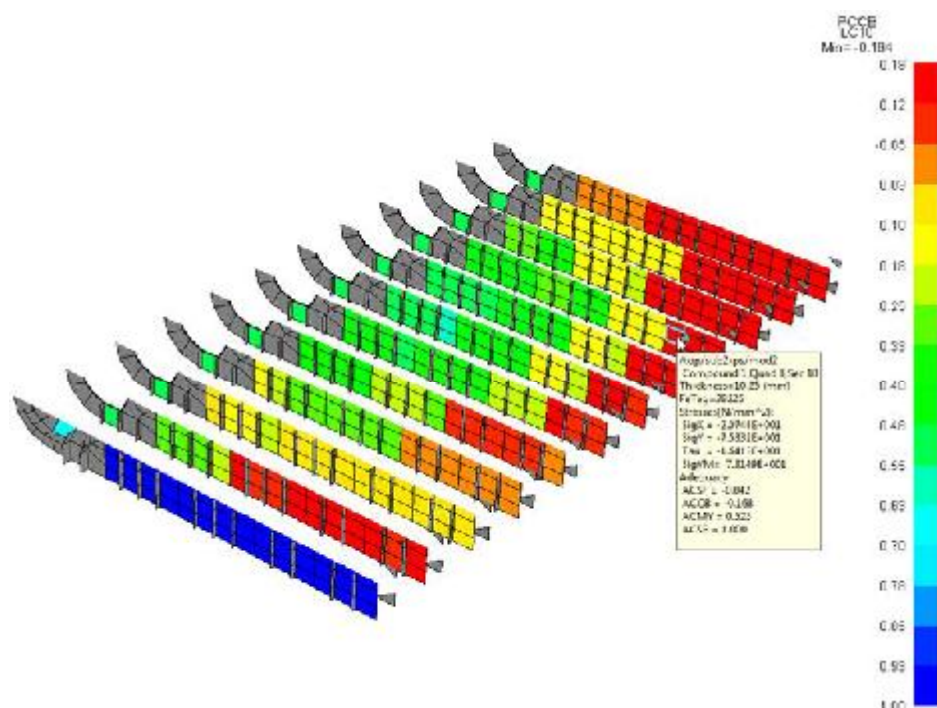
Slika 36. Najmanjip ostignuti faktor podobnosti rebrenica u LC4 sa kriterijem PCCB



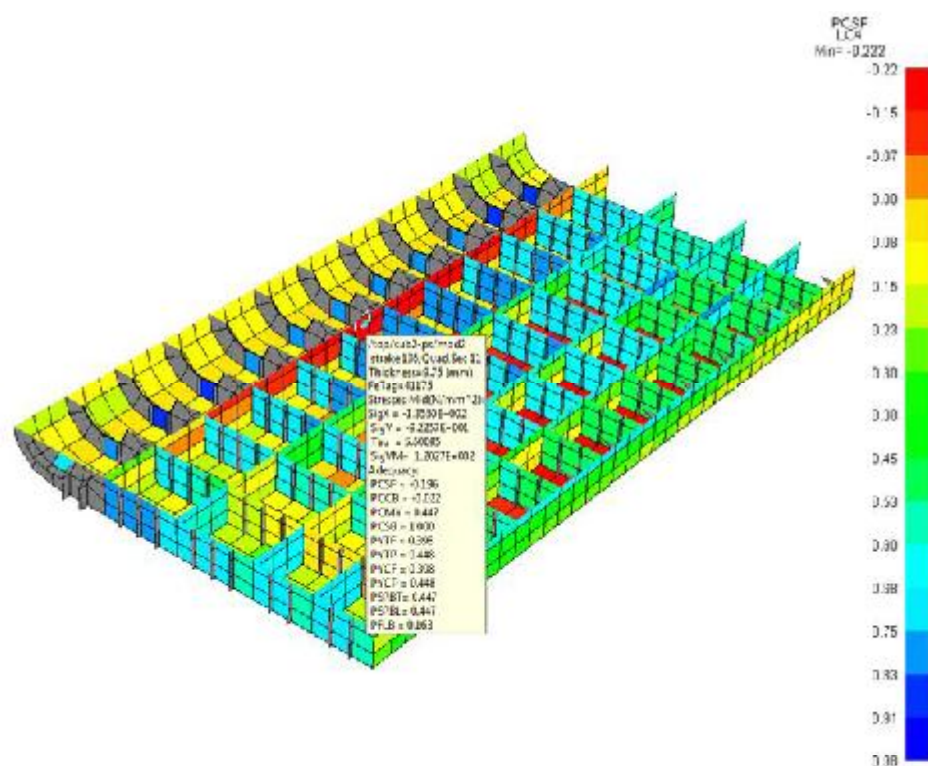
Slika 37. Najmanjip ostignuti faktor podobnosti rebrenica u LC5 sa kriterijem PCCB



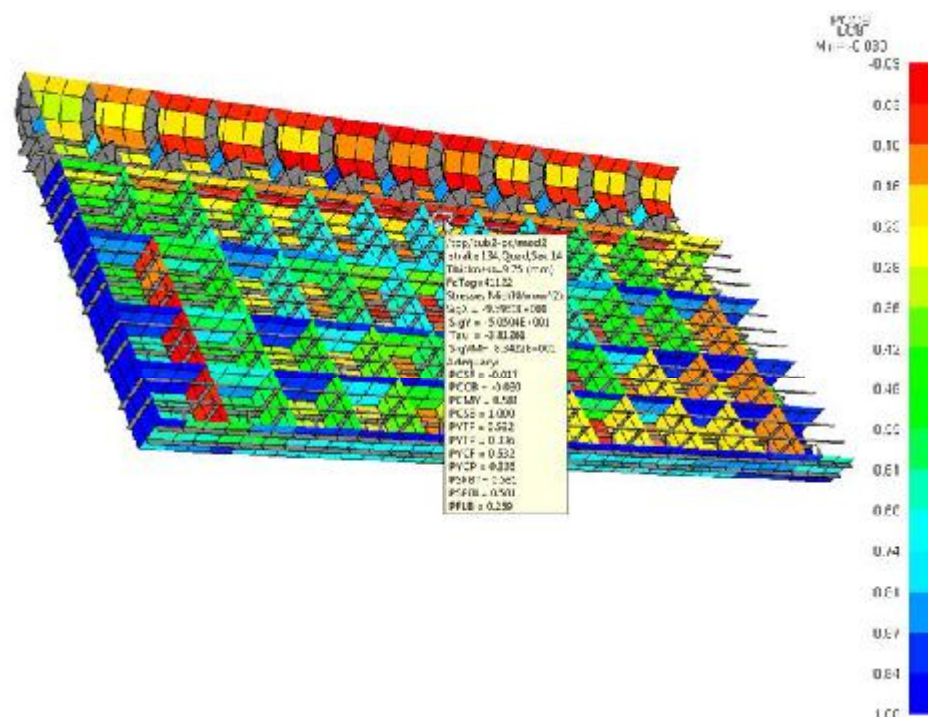
Slika 38. Najmanji postignuti faktor podobnosti rebrerica u LC9 sa kriterijem PCCB



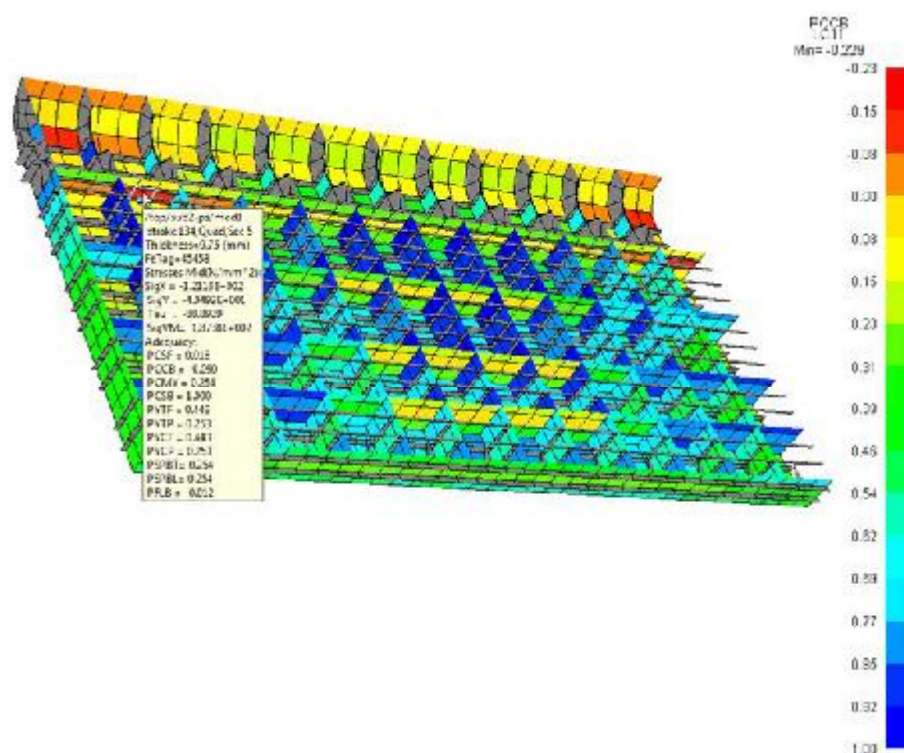
Slika 39. Najmanji postignuti faktor podobnosti rebrerica u LC10 sa kriterijem PCCB



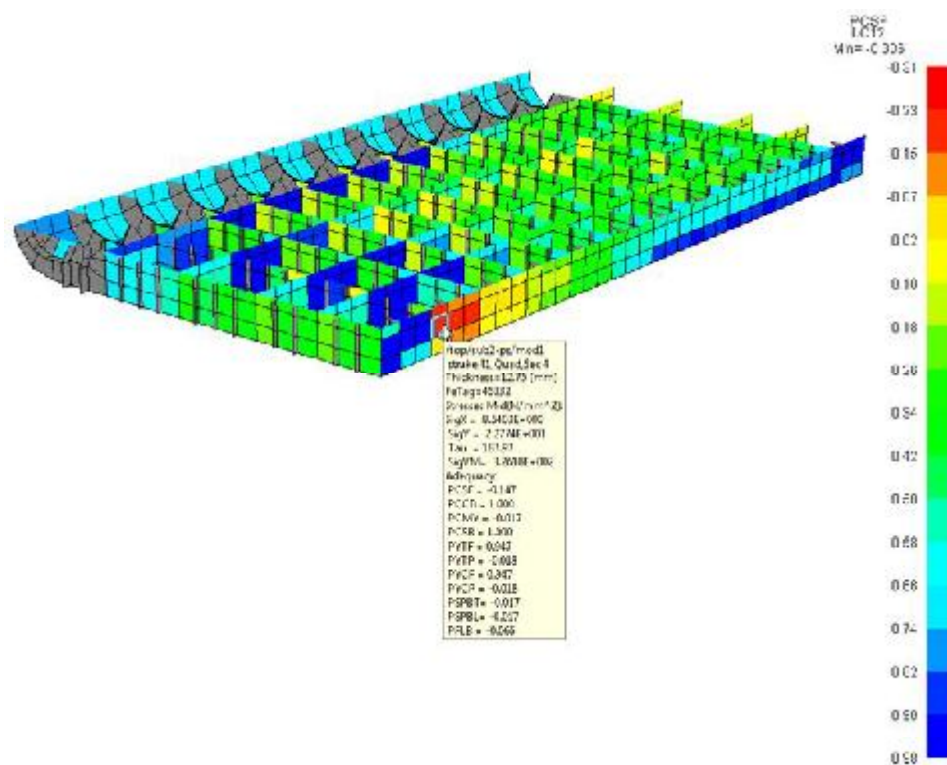
Slika 40. Najmanjipostignuti faktor podobnosti uzduznog nosača na 11690 od CL-a u LC4 sa kriterijem PCSF



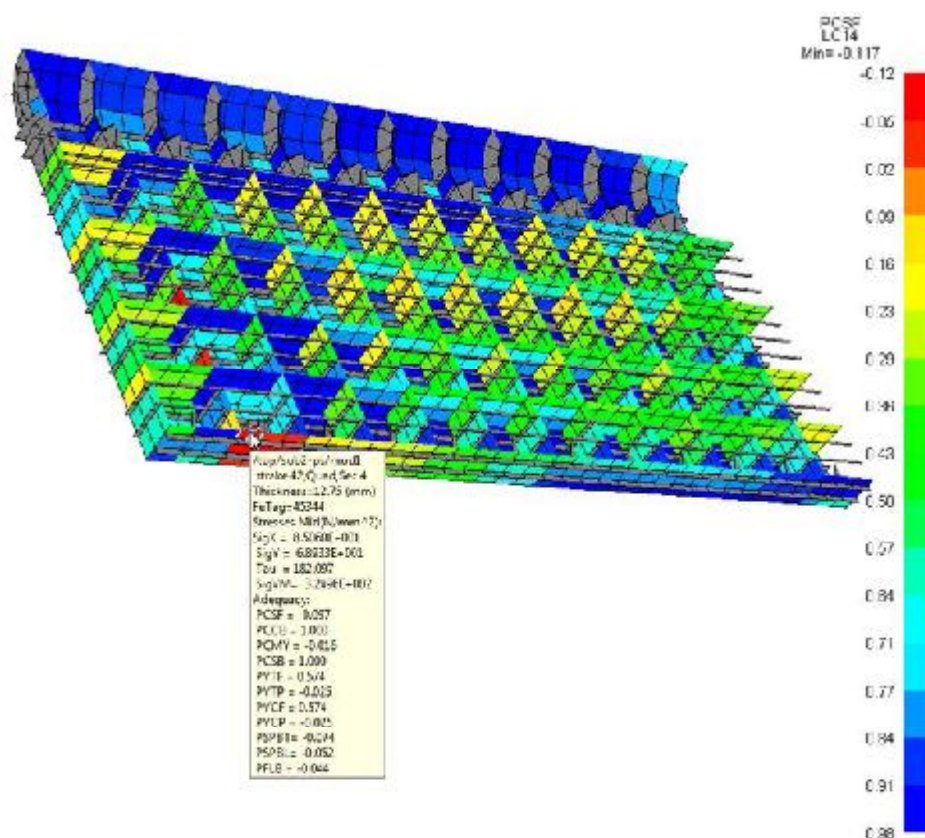
Slika 41. Najmanjipostignuti faktor podobnosti uzduznog nosača na 11690 od CL-a u LC8 sa kriterijem PCCB



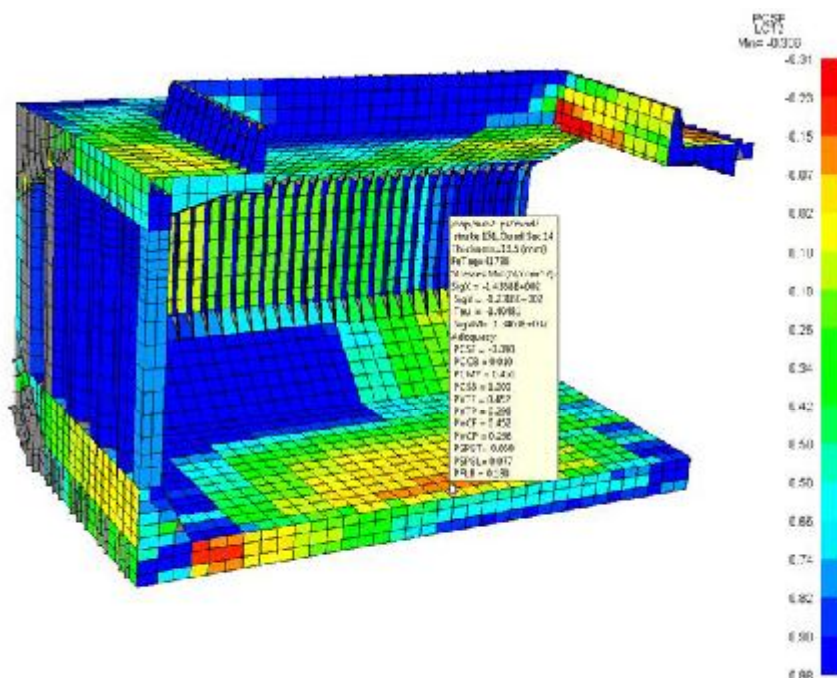
Slika 42. Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnog nosača na 11690 od CL-a u LC11 sa kriterijem PCCB



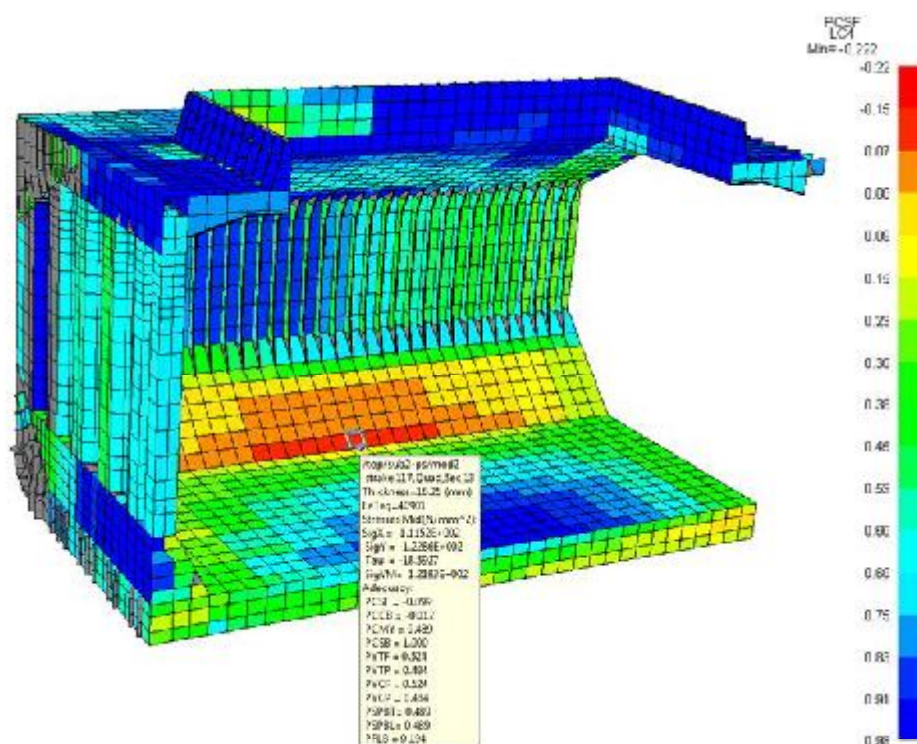
Slika 43. Najmanjipostignuti faktori podobnosti uzdužnog nosača na CL-u u LC12 sa kriterijem PCSF



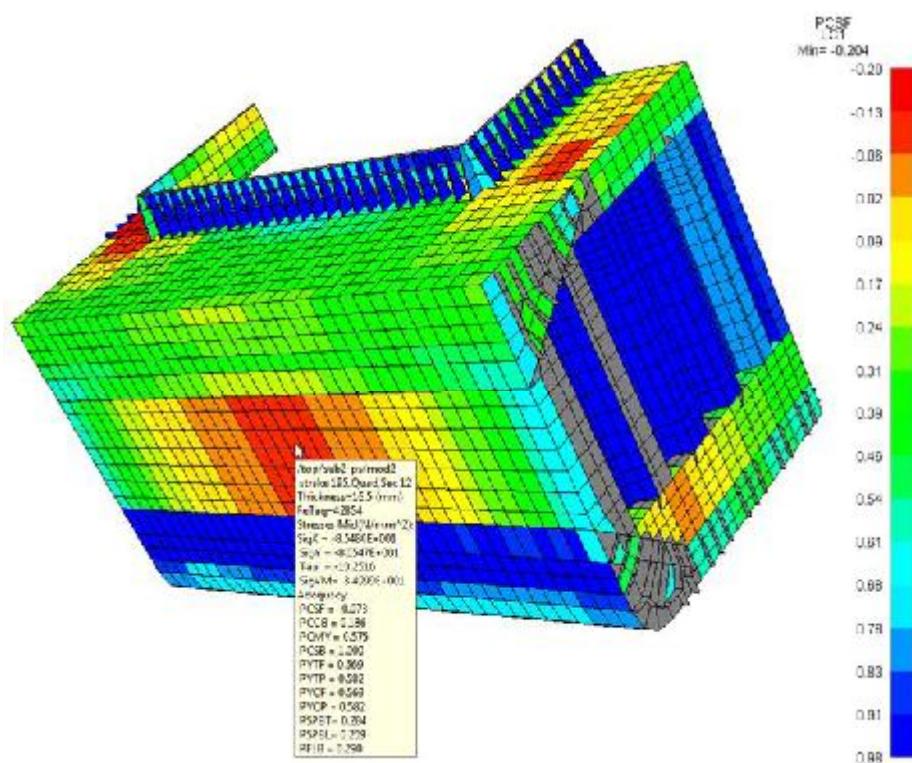
Slika 44. Najmanjipostignutifaktorpodobnosti uzdužnog nosača na CL-u u LC14 sa kriterijem PCSF



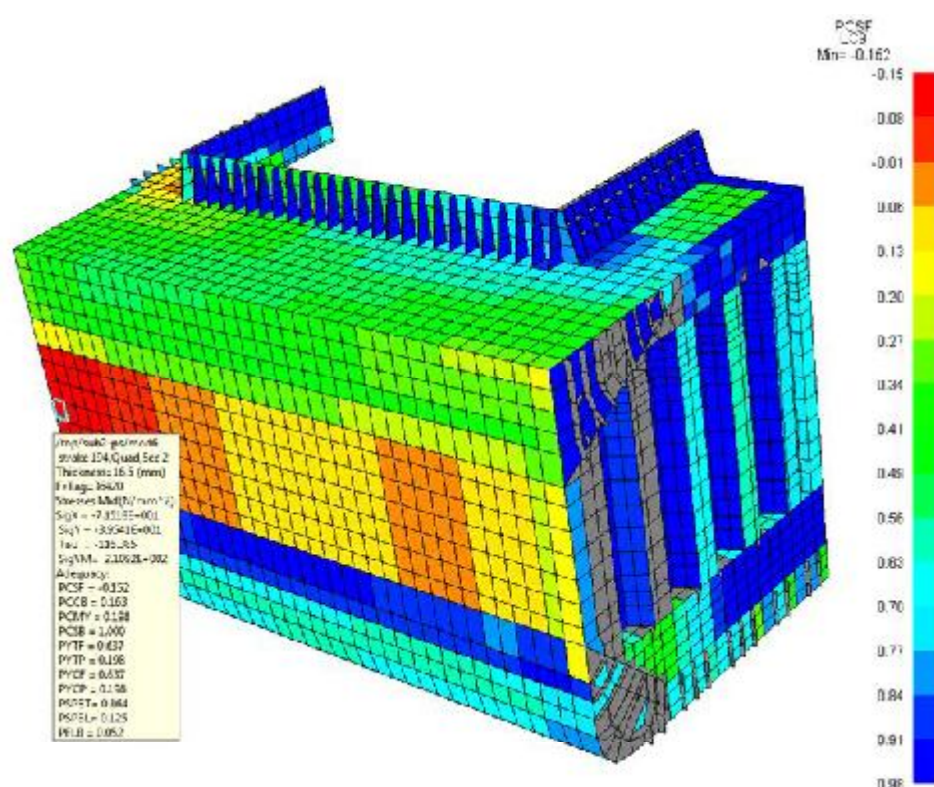
Slika 45. Najmanjipostignuti faktor podobnosti pokrova dvodna u LC12 sa kriterijem P C SF



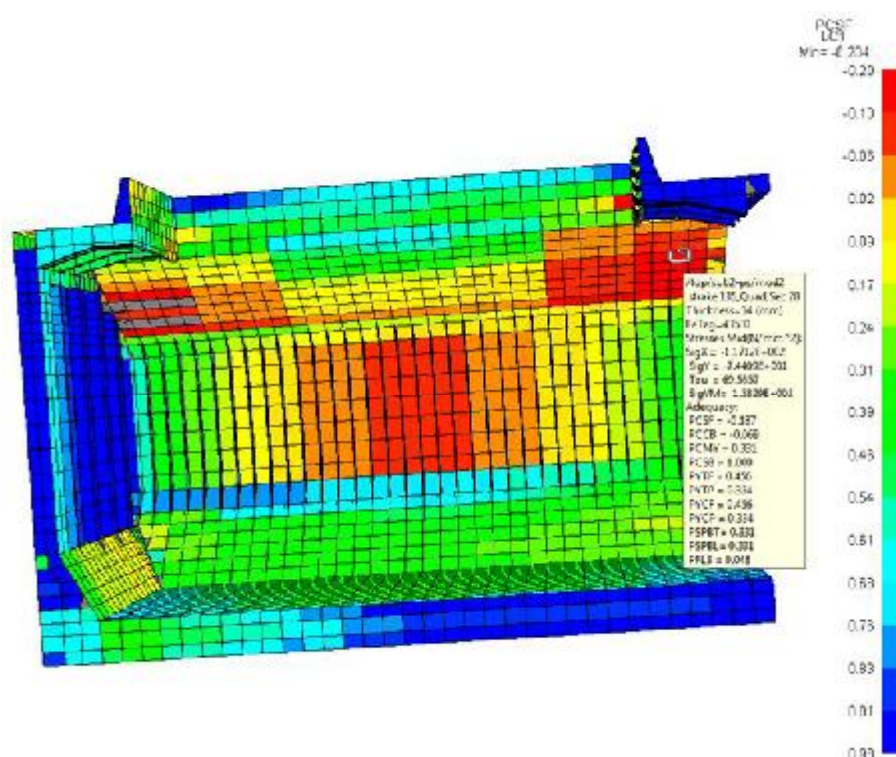
Slika 46. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata donjeg uzvojnog tanka u LC4 sa kriterijem P C SF



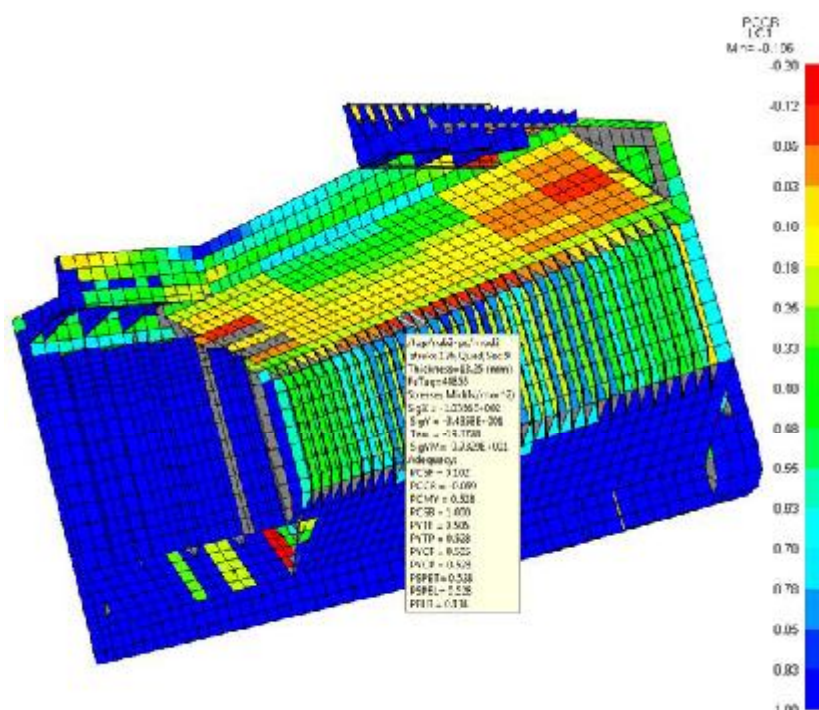
Slika 47. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata boka broda u LC1 sa kriterijem P C SF



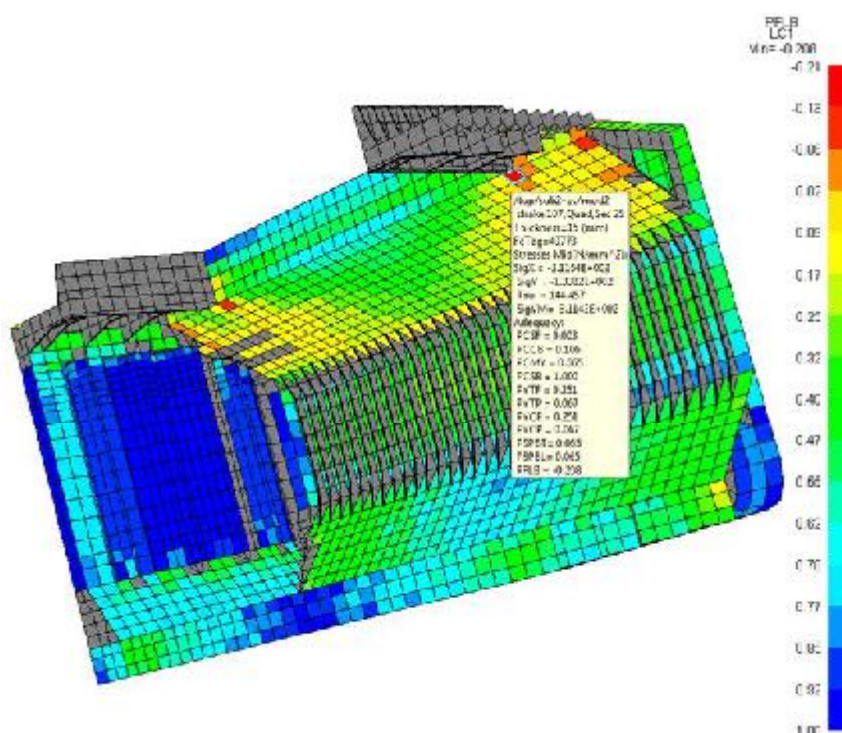
Slika 48. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata boka broda u LC9 sa kriterijem PCSF



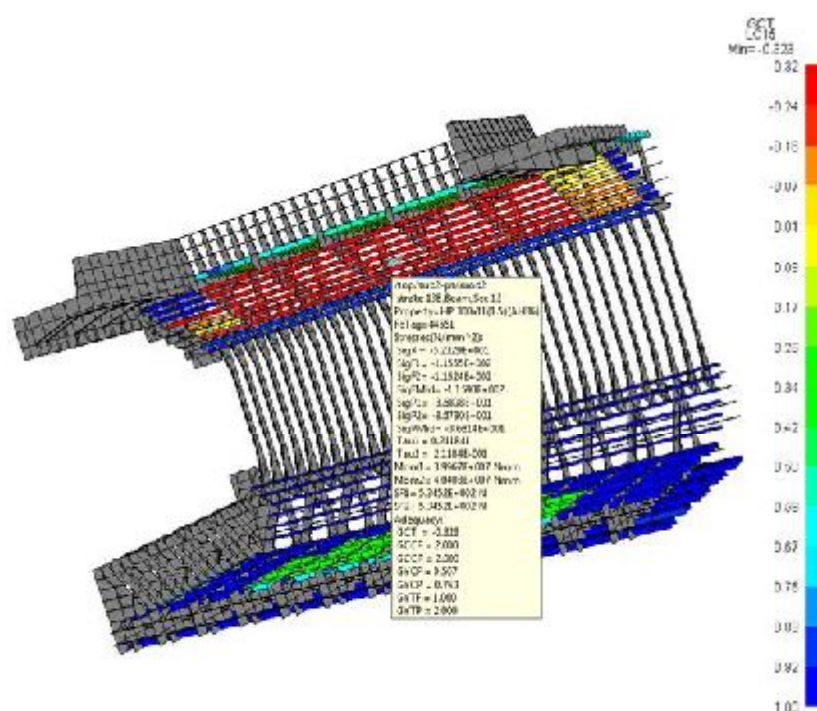
Slika 49. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplate gornjeg uzvojnog tanka u LC1 sa kriterijem PCSF



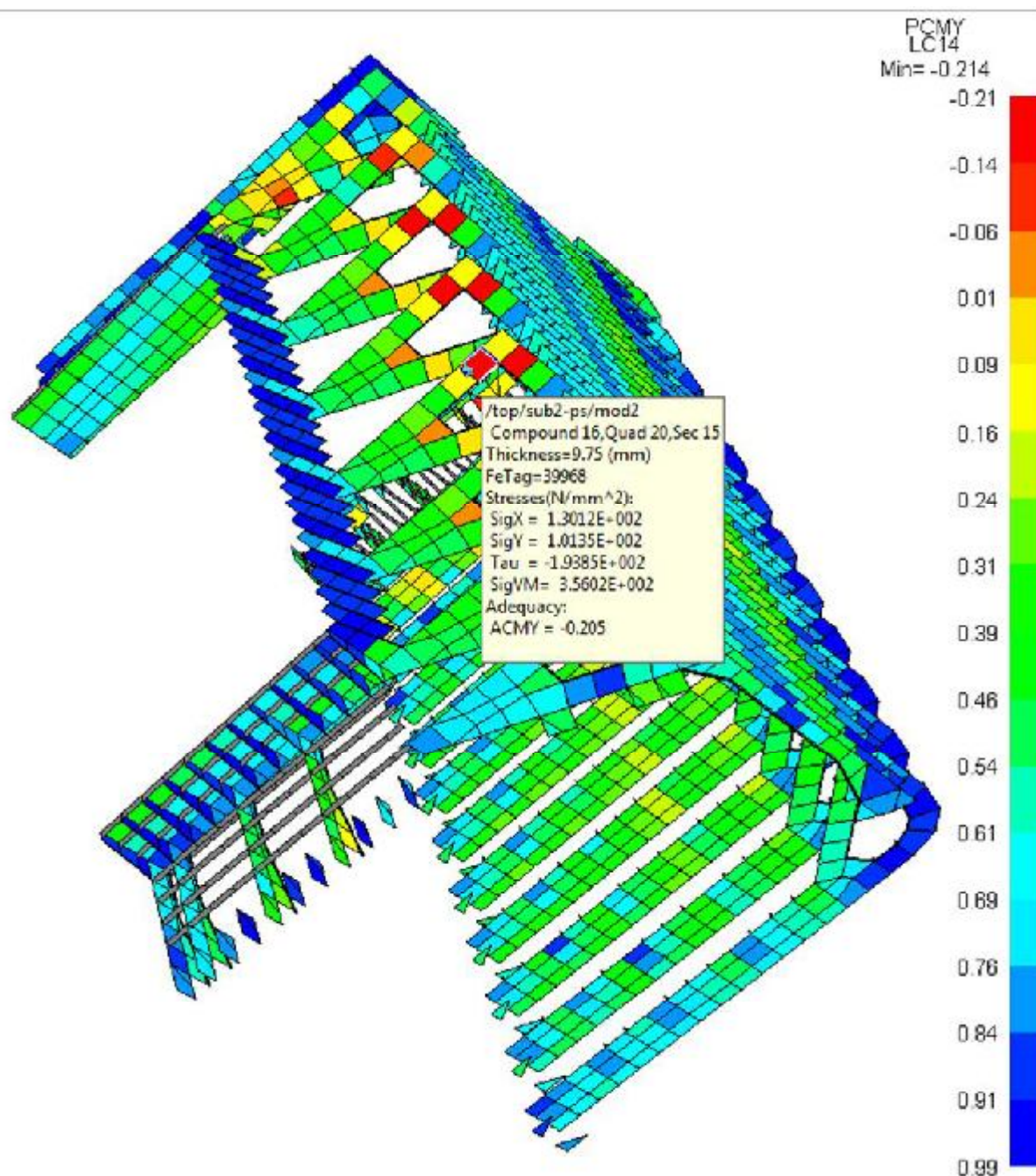
Slika 50. Najmanjipostignuti faktor podobnosti oplategornjeg uzvojnog tanka izmedu uzduznjaka br. 9 i oplate boka u LC1 sa kriterijem PCCB



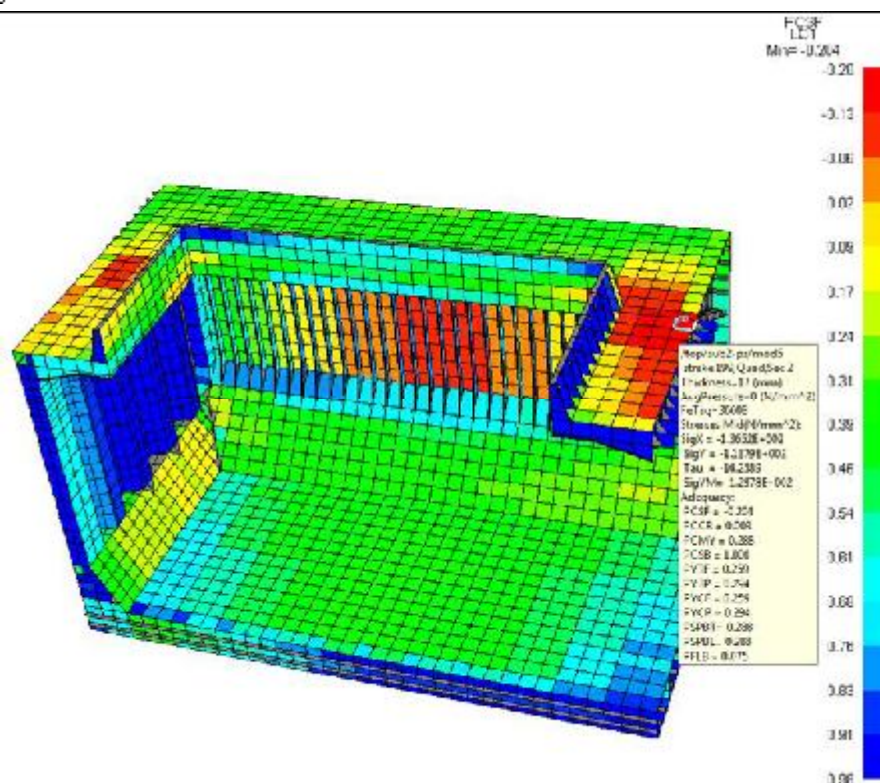
Slika 51. Najmanji postignuti faktor podobnosti naprezanje oplata gornjeg uzvojnog tanka u LC1 sa kriterijem PFLB



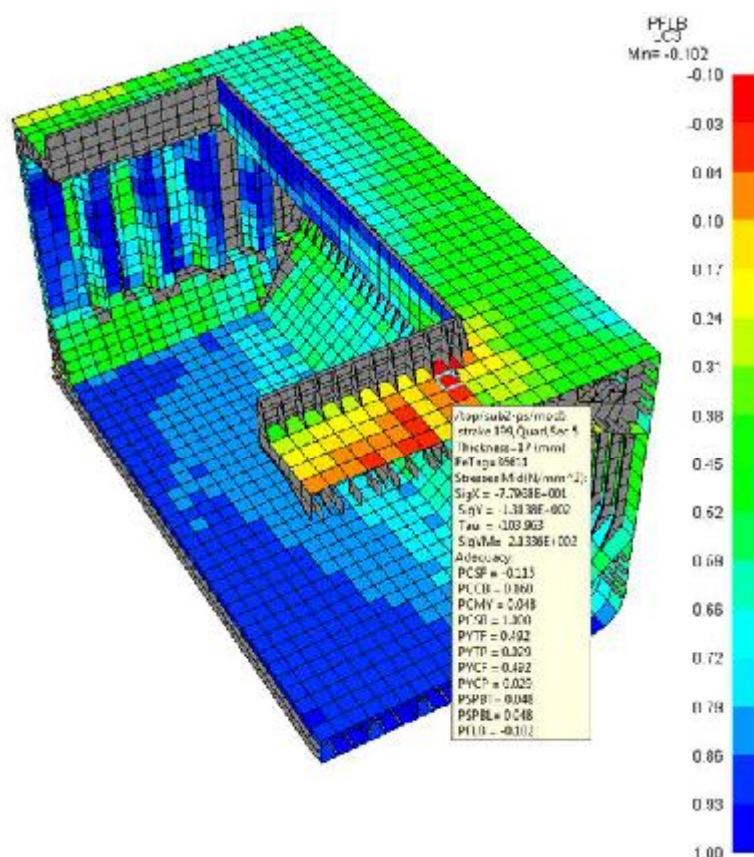
Slika 52. Najmanji postignuti faktor podobnosti uzdužnjaka gornjeg uzvojnog tanka u LC15 sa kriterijem GCT



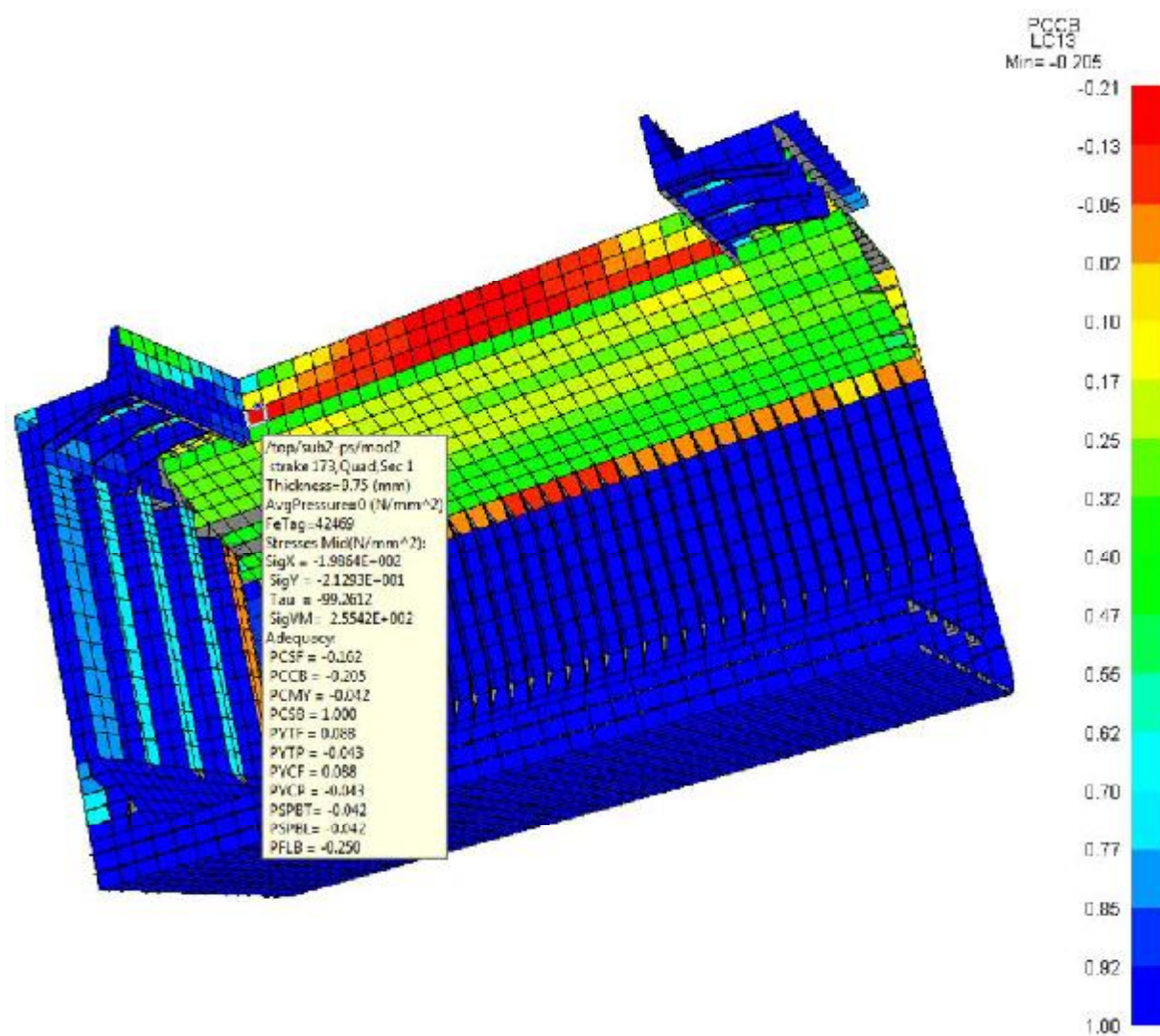
Slika 53. Najmanjipostignuti faktor podobnosti okvira poprečne strukture gornjeg uzvojnog tanka u LC14 sa kriterijem PCMY



Slika 54. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata palube između grotenih otvora u L C1 sa kriterijem PCSF



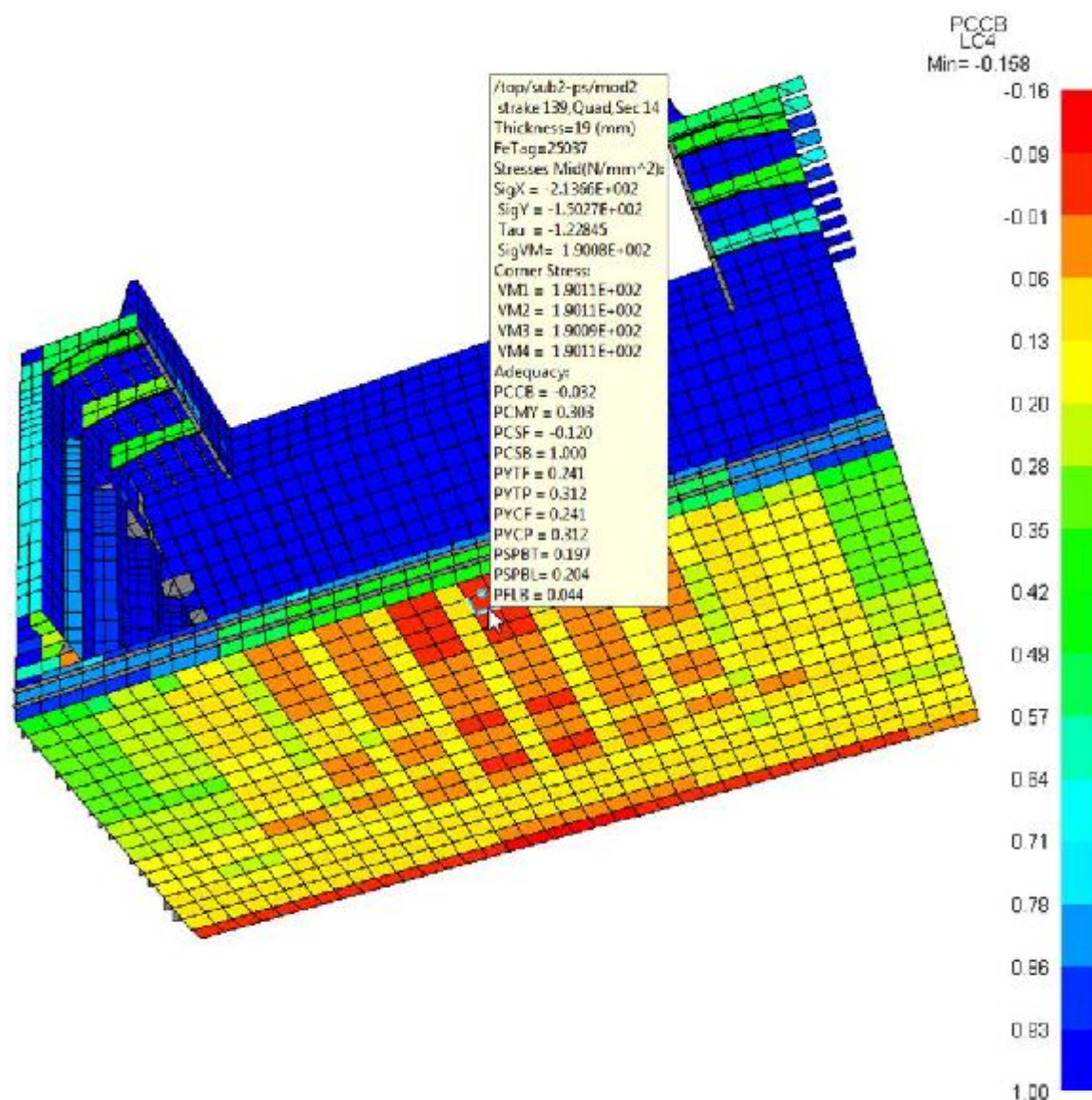
Slika 55. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata palube između grotenih otvora u L C3 sa kriterijem PFLB



Slika 56. Najmanji postignuti faktor podobnosti oplata uzdužne praznice grota u LC5 sa kriterijem PCCB

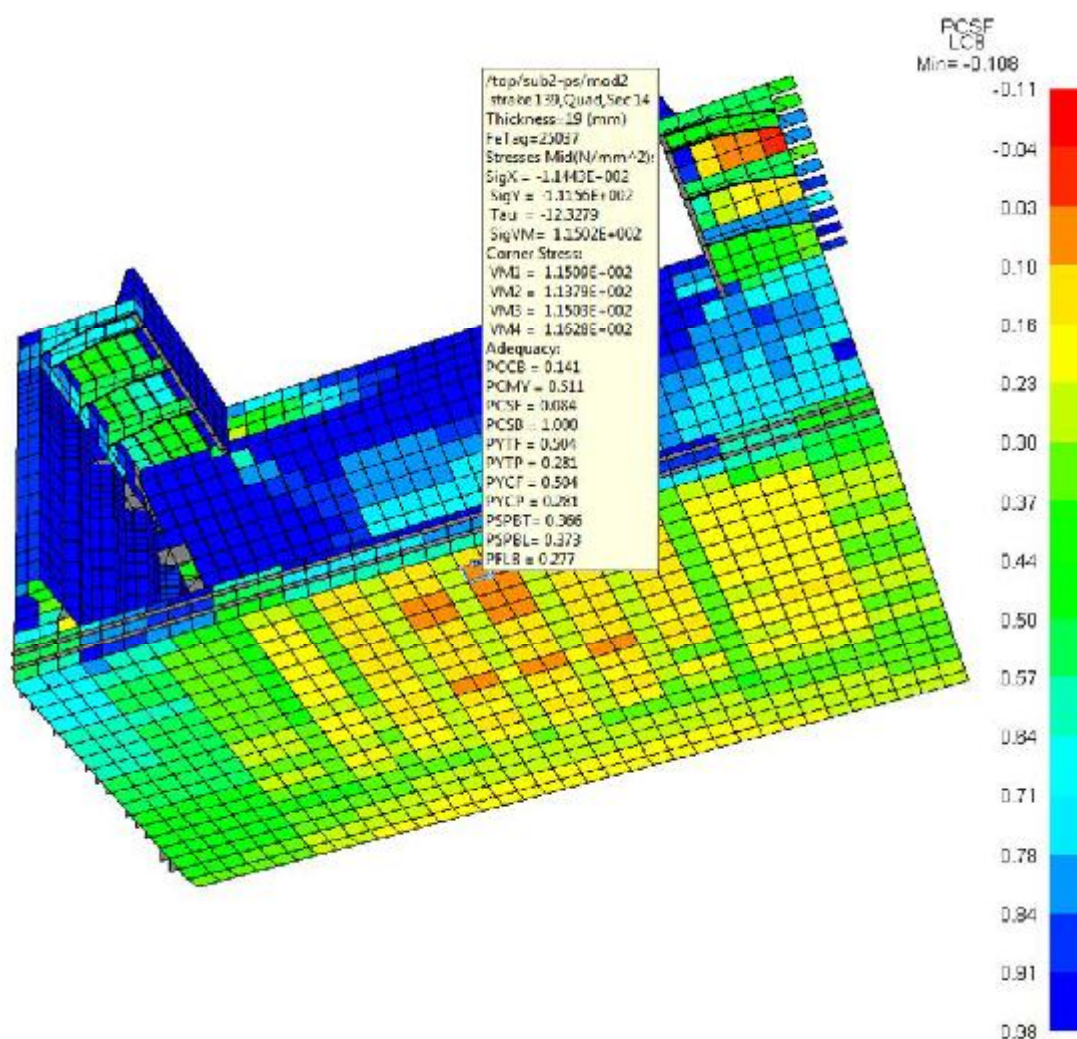
5.2. Prijedlozi zahvata na konstrukciji u svrhu zadovoljenja IACS Pravila

Slike koje slijede prikazuju zone na koje se odnose prijedlozi za poboljšanje konstrukcije broda Prijedlog, te zadovoljenje kriterija podobnosti definiranih u **Tablici 13**.



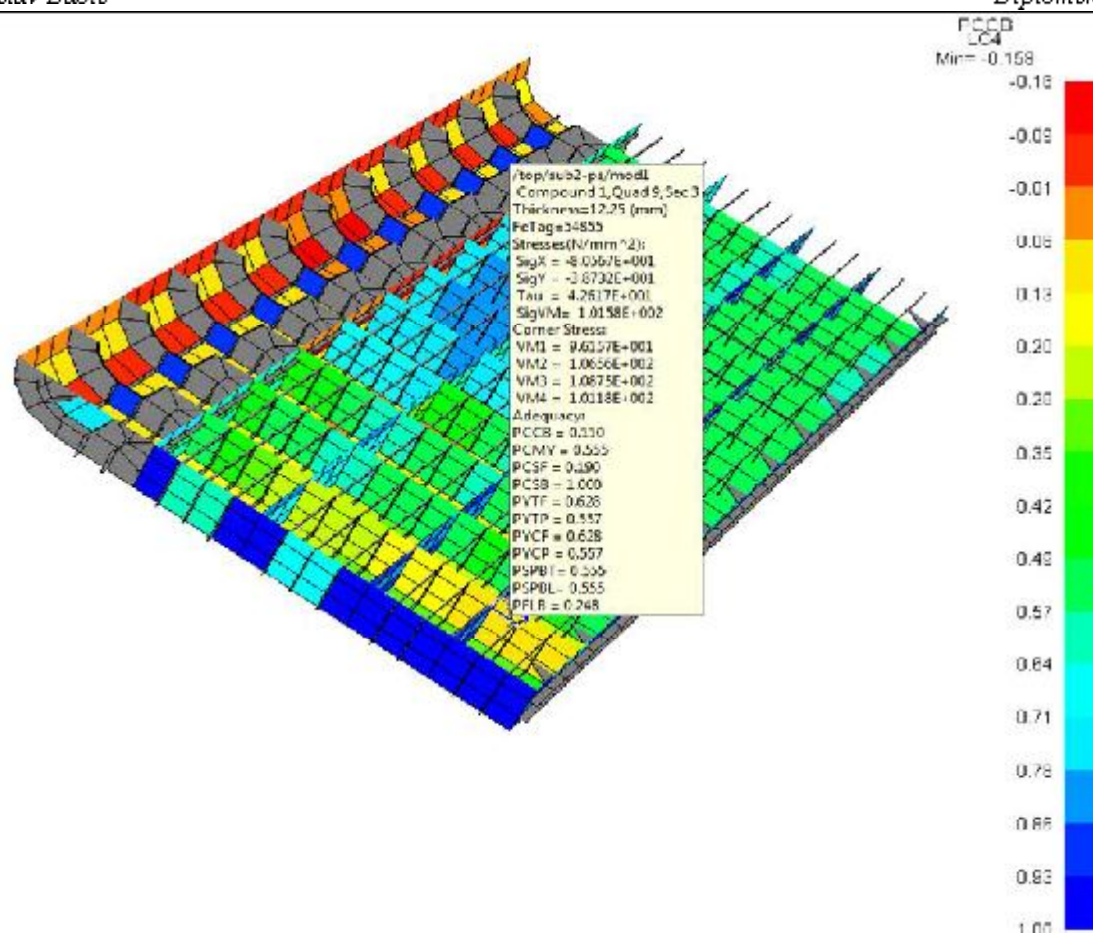
Slika 57. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture dna za PCCB kriterij

Implementirano : anti-buckling ukrepe FB 100x10 od rebra 120 do 138 sa razmakom 1222.5 do uzdužnog nosača 11690 od CL.



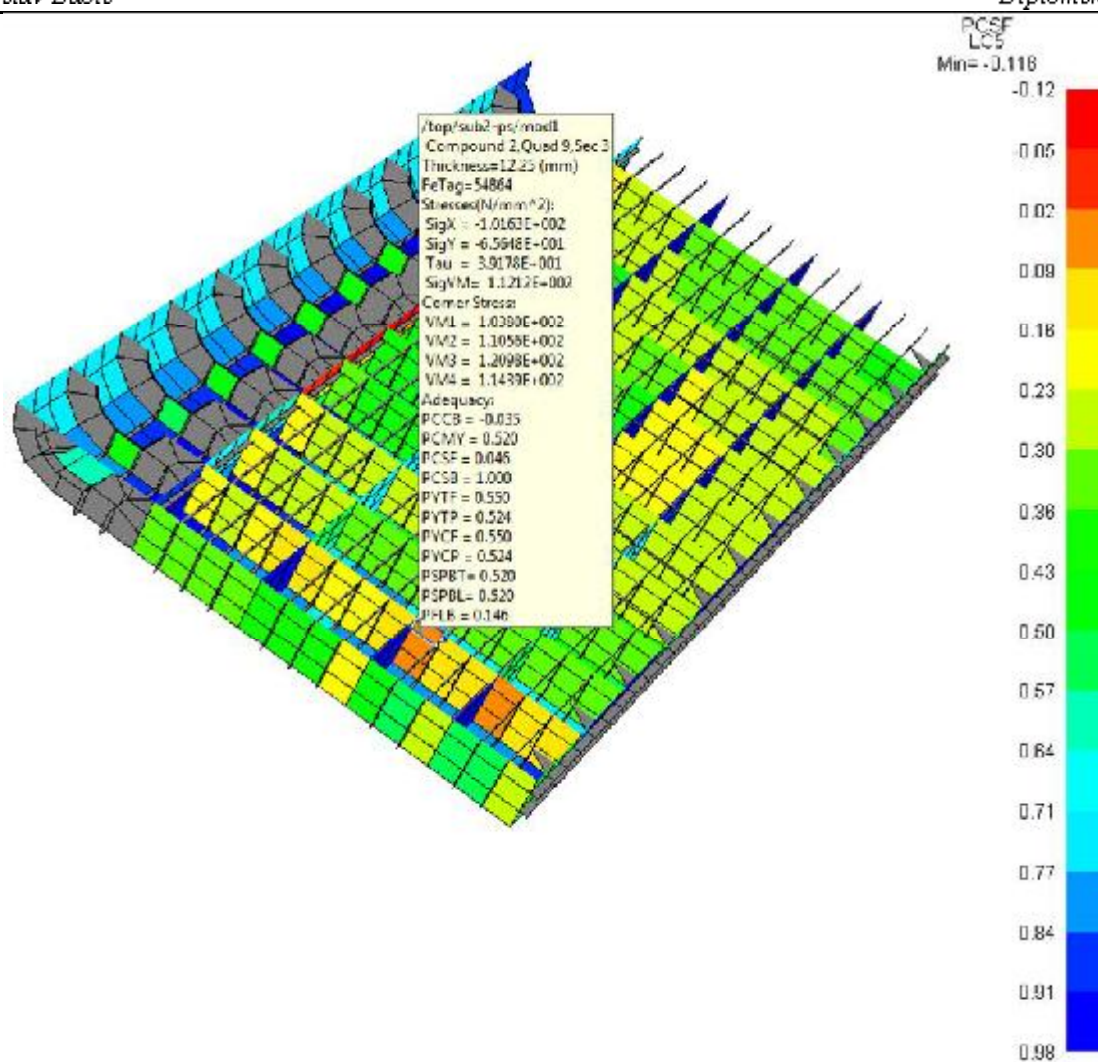
Slika 58. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture dna za PCSF kriterij

Implementirano : anti-buckling ukrepe FB 100x10 od rebra 120 do 138 sa razmakom 1222.5
do uzdužnog nosača 11690 od CL .



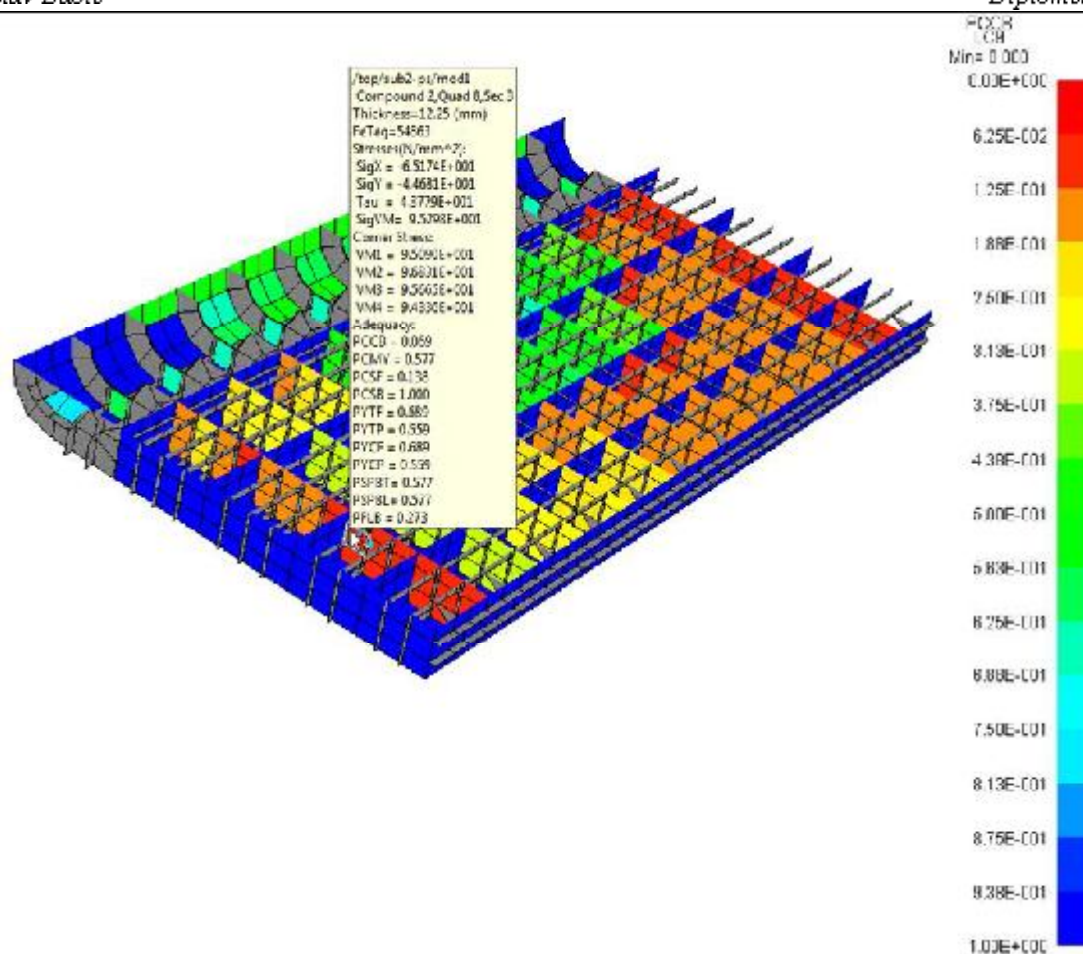
Slika 59. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCCB kriterij

Implementirano : povećanje debljine rebrenica 12→14 mm na rebrima 113,116,143



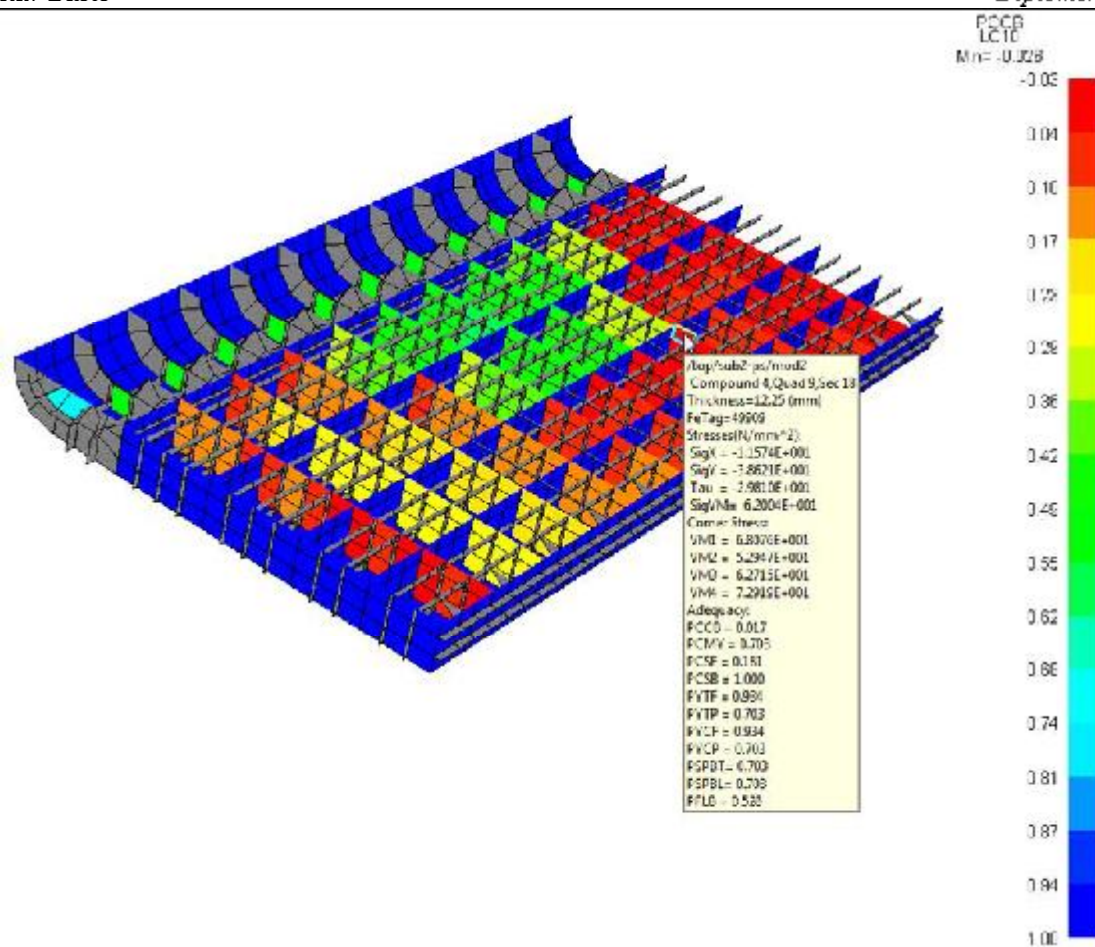
Slika 60. Postignuti faktori podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCSF kriterij

Implementirano : povećanje debljine rebrenica 12→14 mm na rebrima 113,116,143



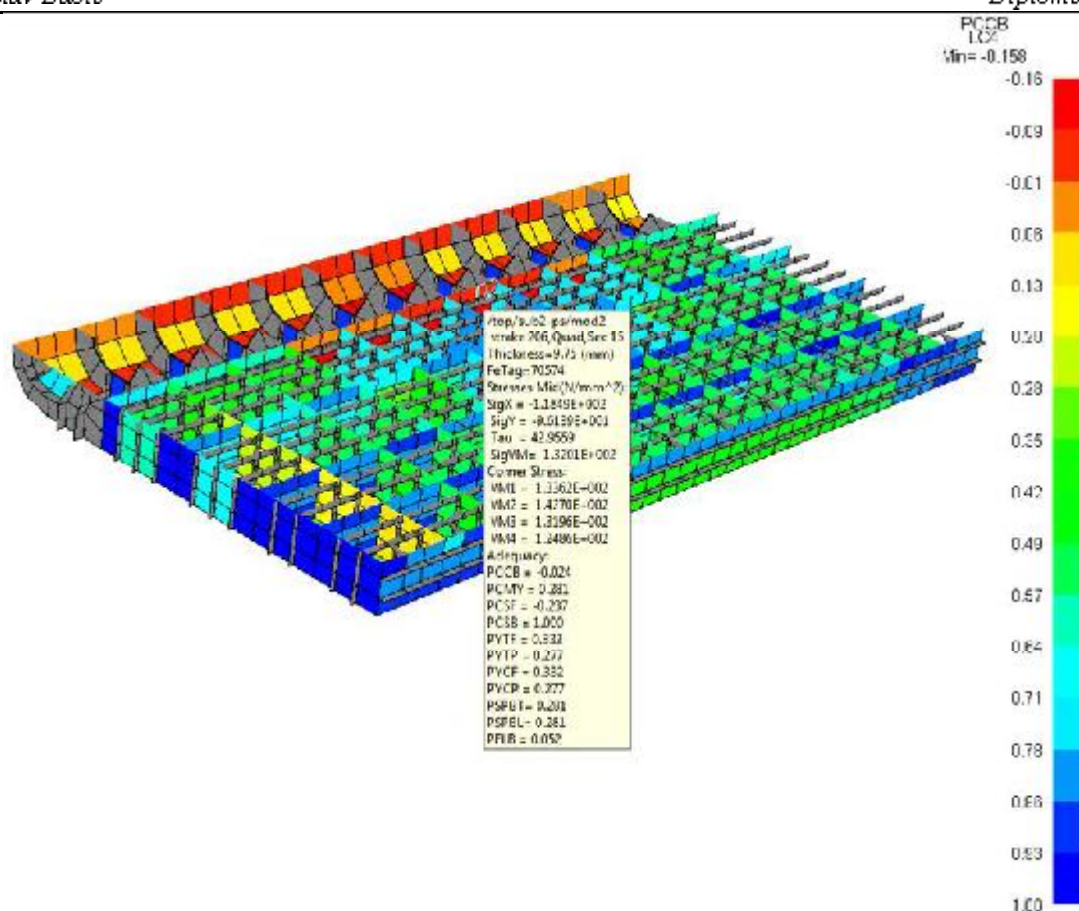
Slika 61. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCCB kriterij

Implementirano : povećanje debljine rebrenica 12→14 mm na rebrima 113,116,143



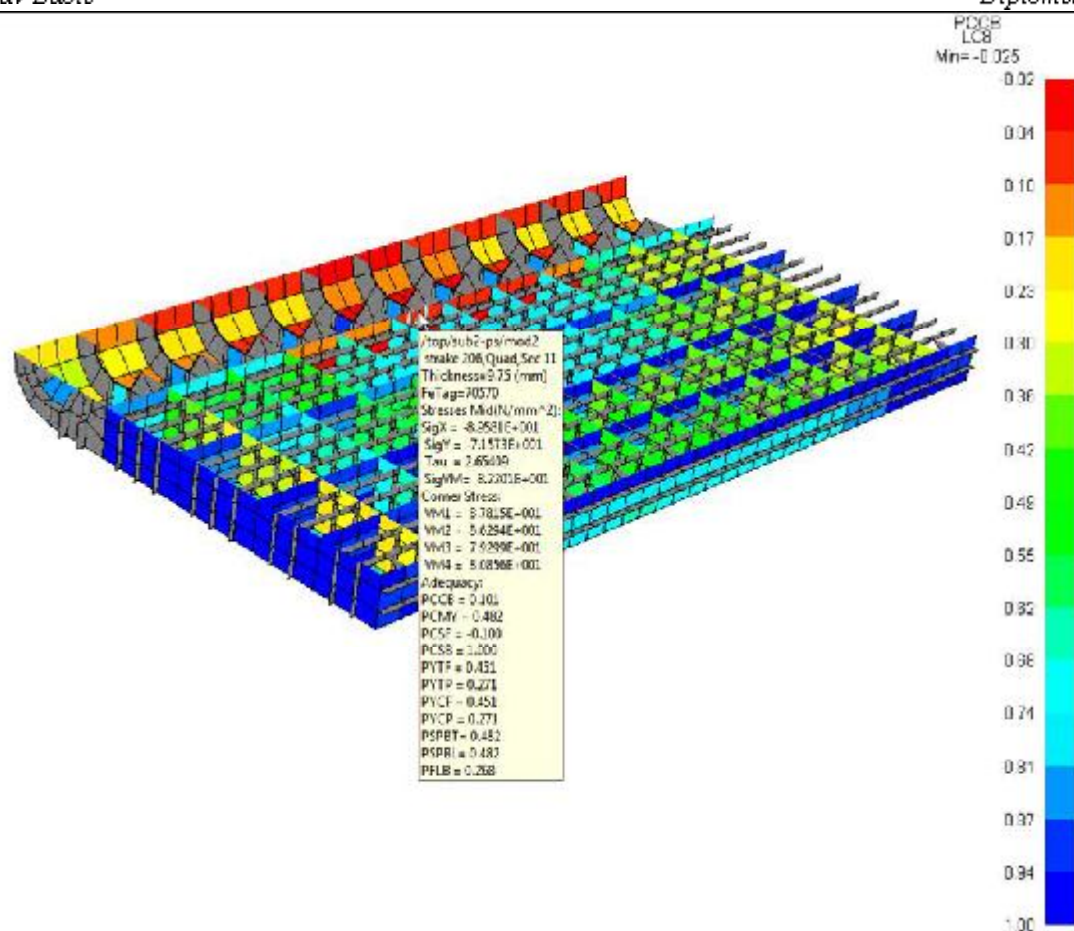
Slika 62. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture rebrenica za PCCB kriterij

Implementirano : povećanje debljine rebrenica 12→14 mm na rebrima 113,116,143



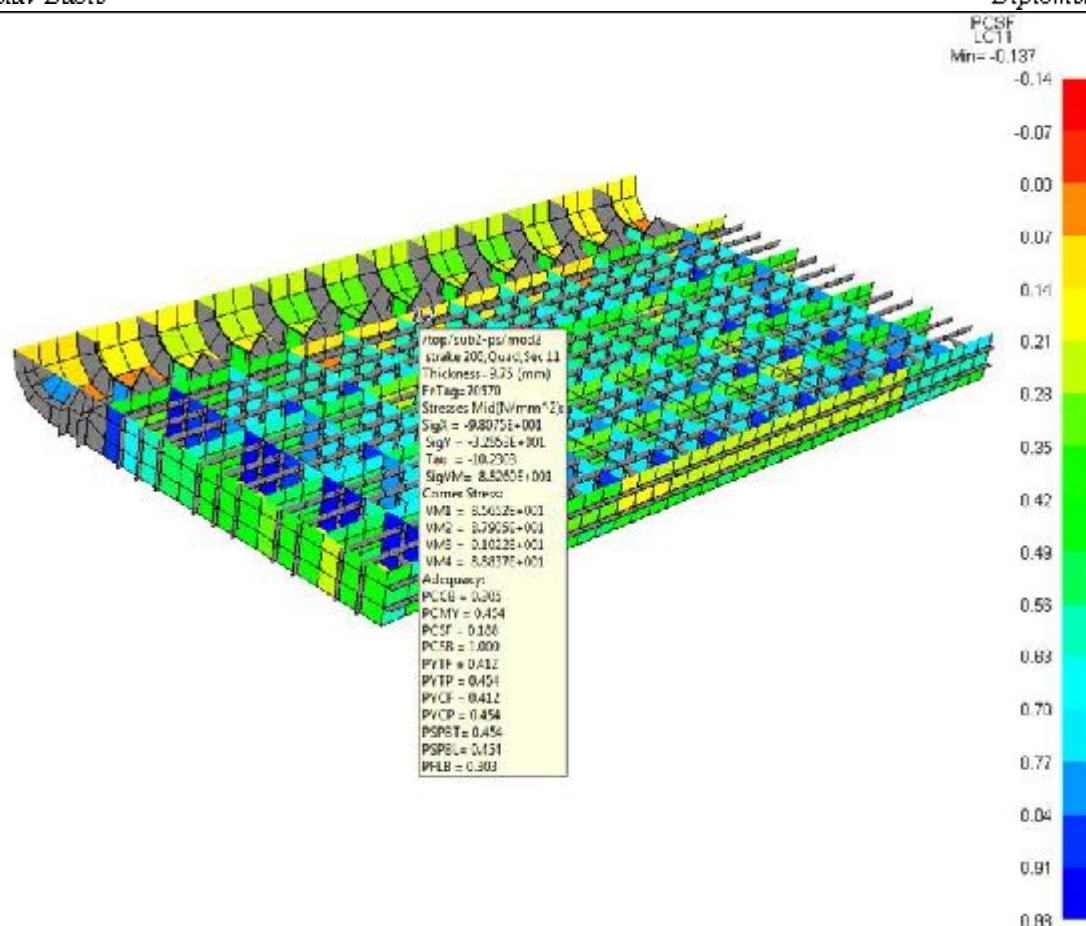
Slika 63. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na 11690 od CL-a za PCCB kriterij

Implementirano : povećanje debljine uzdužnih nosača 11.5→18 mm na rebrima 110-119 i 137-146



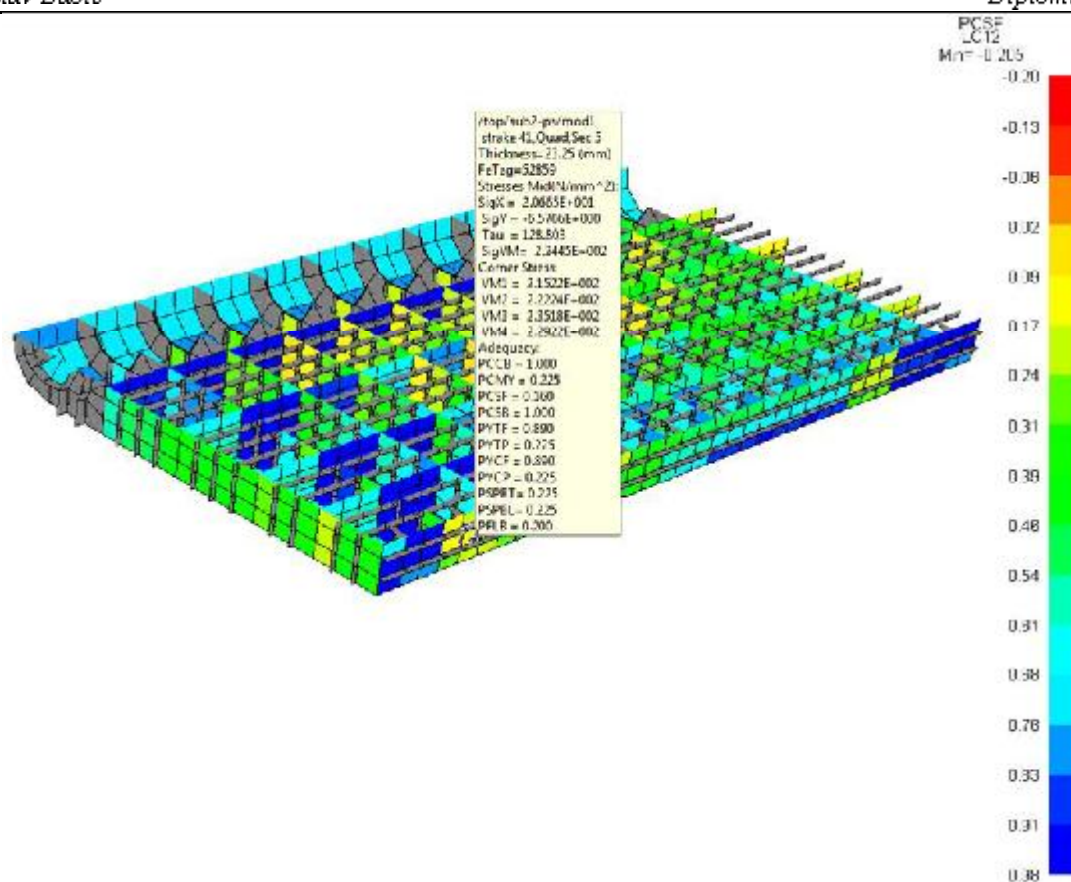
Slika 64. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na 11690 od CL-a za PCCB kriterij

Implementirano : povećanje debljine uzdužnih nosača 11.5→18 mm na rebrima 110-119 i 137-146



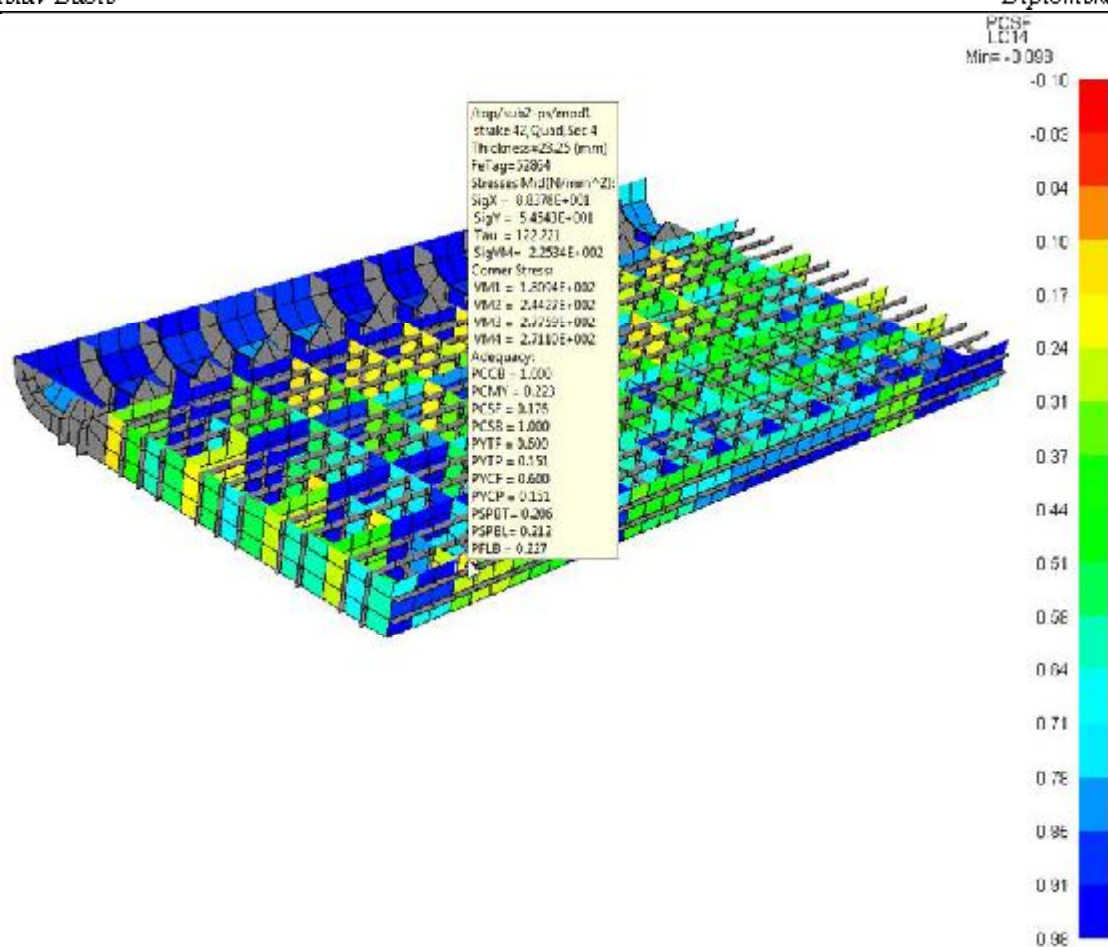
Slika 65. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na 11690 od CL-a za PCSF kriterij

Implementirano : povećanje debljine uzdužnih nosača 11.5→18 mm na rebrima 110-119 i 137-146



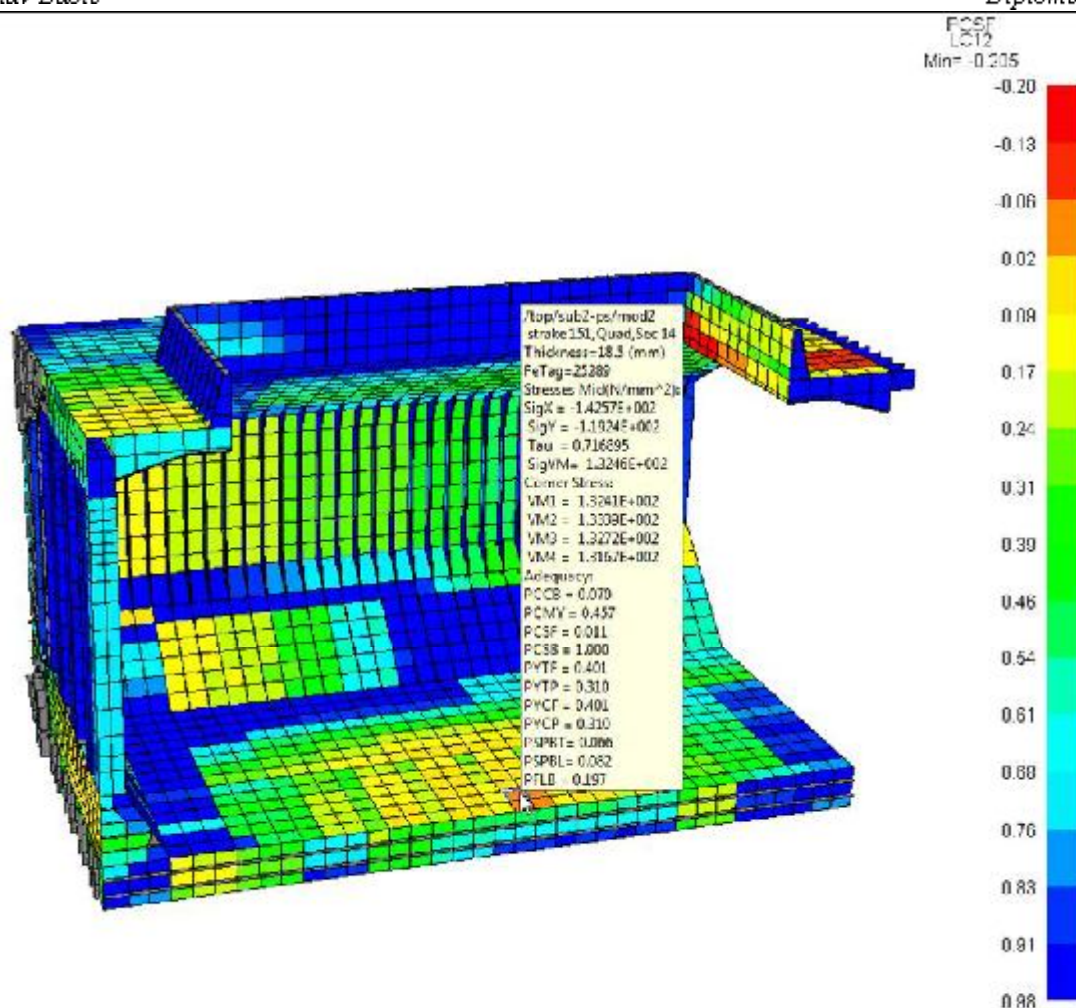
Slika 66. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na CL-u za P CSF kriterij

Implementirano : povećanje debljine uzdužnih nosača od rebra 110-119 i 140-146=25mm, od rebra 119-122 i 137-140=16mm, od rebra 122-137= 14.5mm



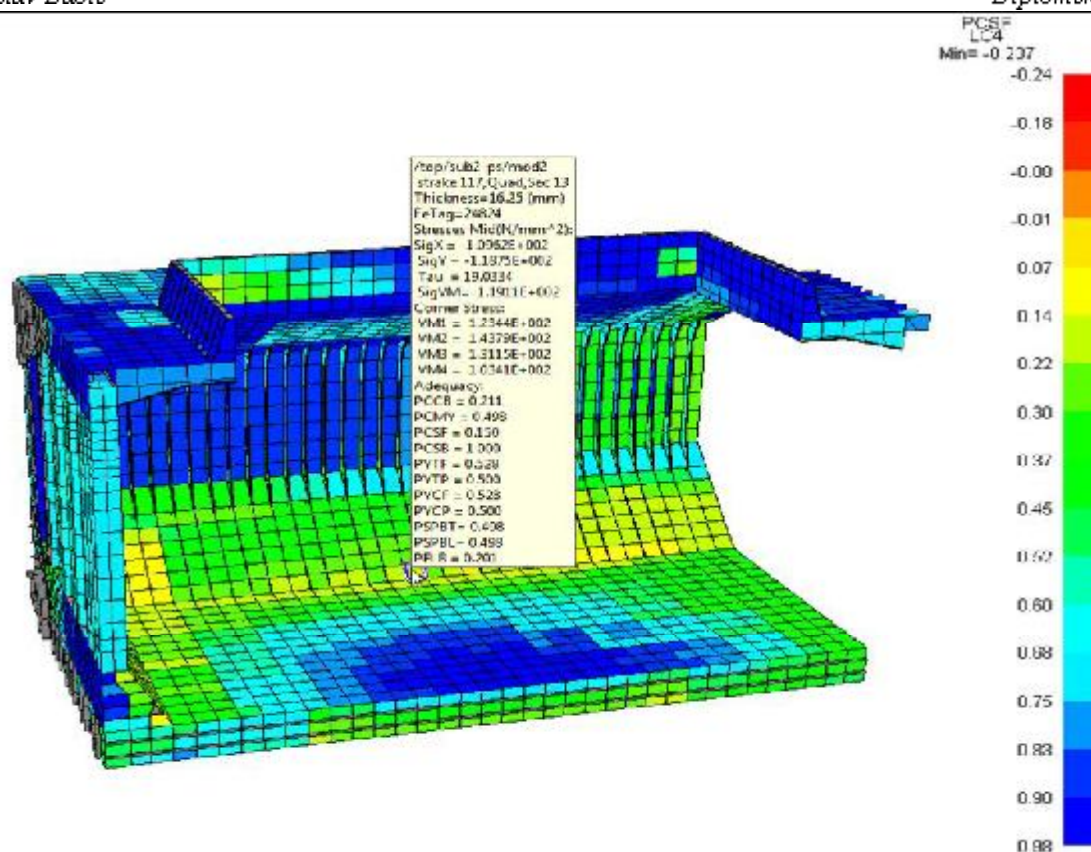
Slika 67. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužnog nosača na CL-u za PCSF kriterij

Implementirano : povećanje debljine uzdužnih nosača od rebra 110-119 i 140-146=25mm, od rebra 119-122 i 137-140=16mm, od rebra 122-137= 14.5mm



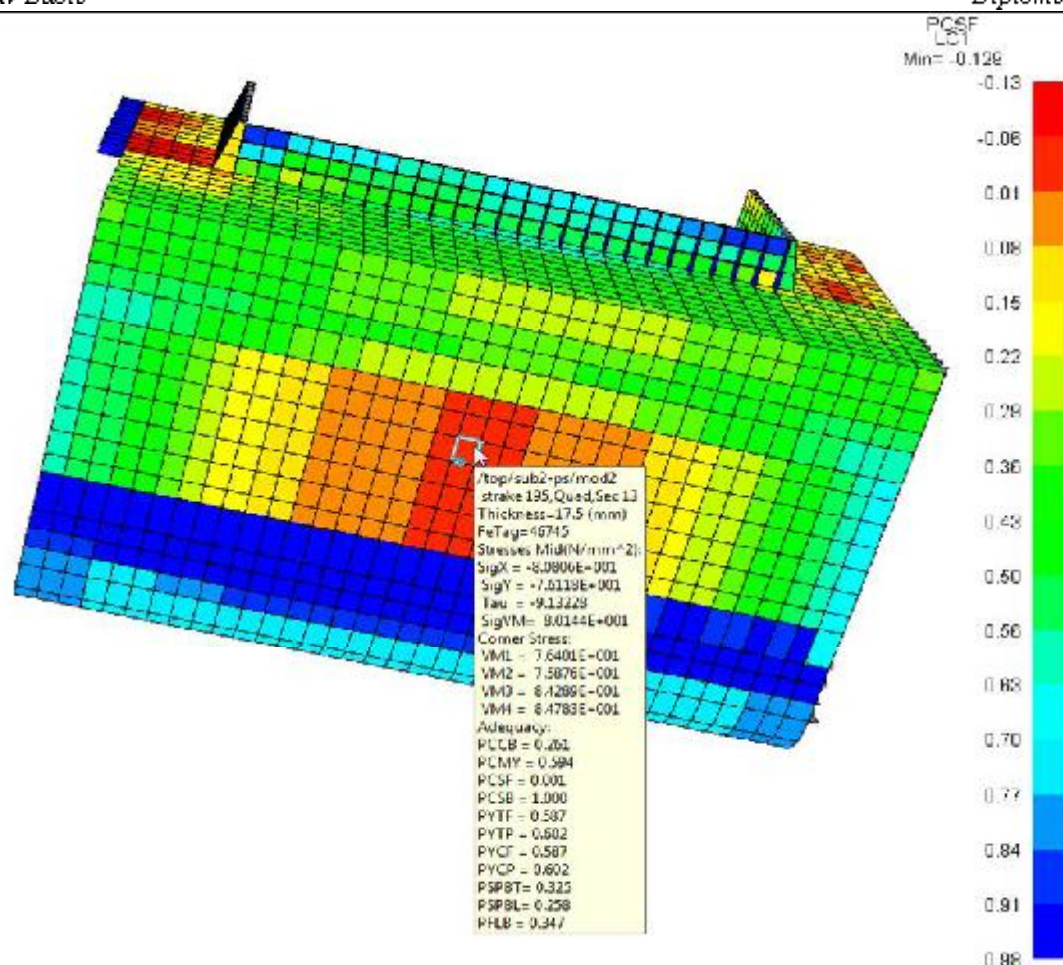
Slika 68. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture pokrova dvodna za P CSF kriterij

Implementirano : anti-buckling ukrepe FB 100x10 od rebra 120 do 138 sa razmakom 1222.5
do uzdužnog nosača 5010 od CL



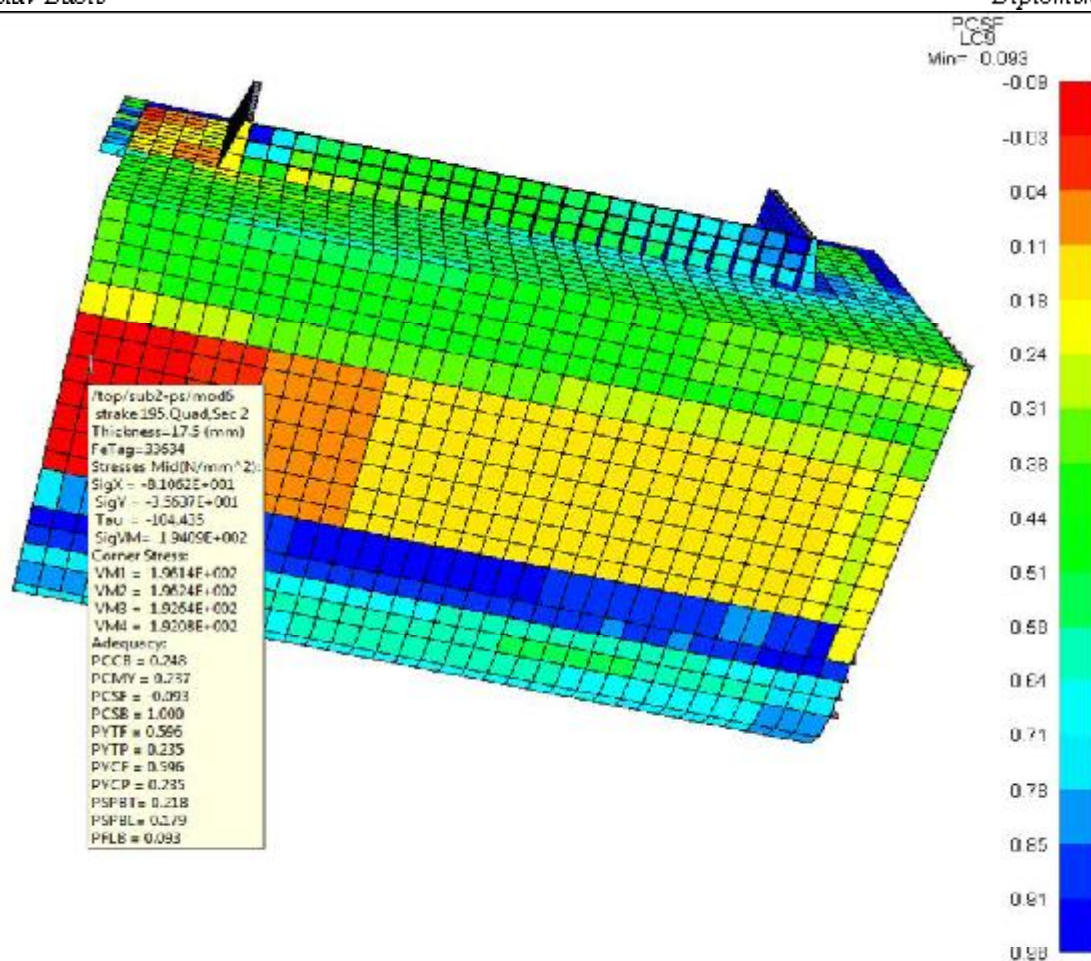
Slika 69. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture op late uzvojnog tanka za PCSF kriterij

Implementirano : poprečne anti-buckling ukrepe FB 100x10 sa razmakom 835mm



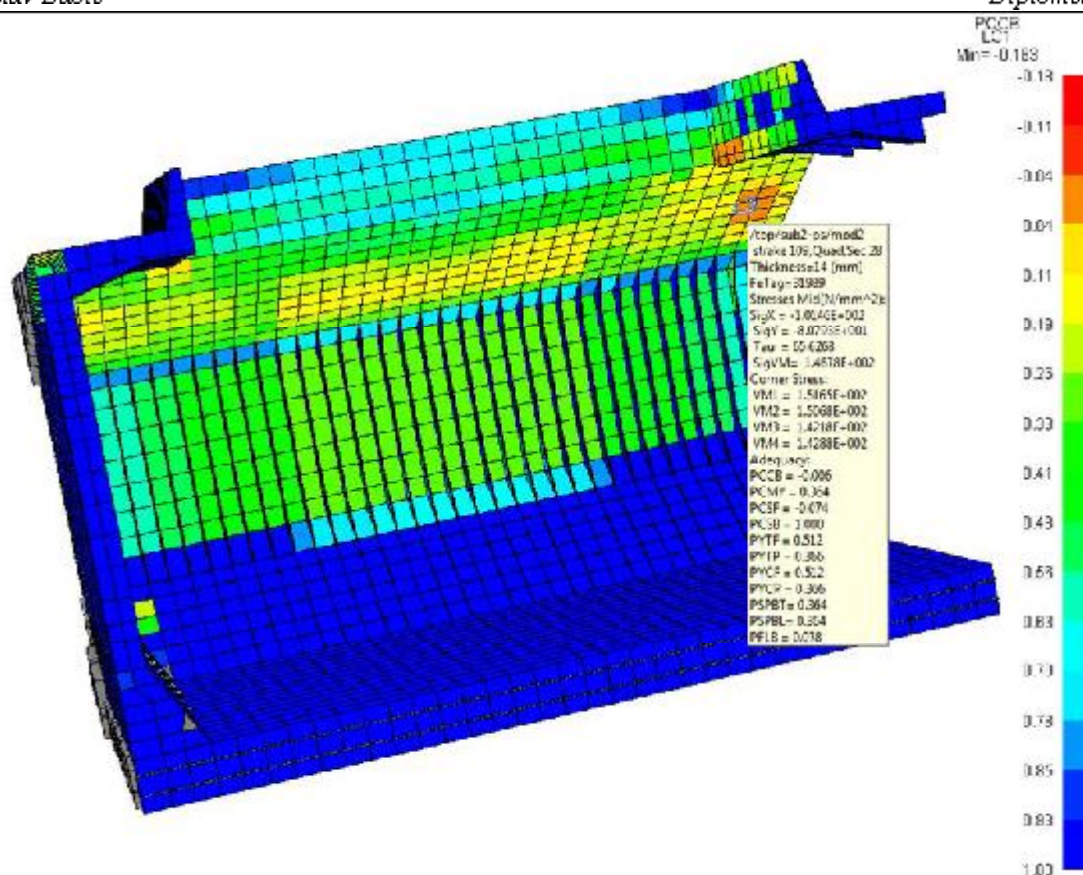
Slika 70. Stanje nakon implementacije prijedloga za LC1 sa PCSF kriterijem

Implementirano : povećanje debljine oplata boka 18.5→19.5 mm



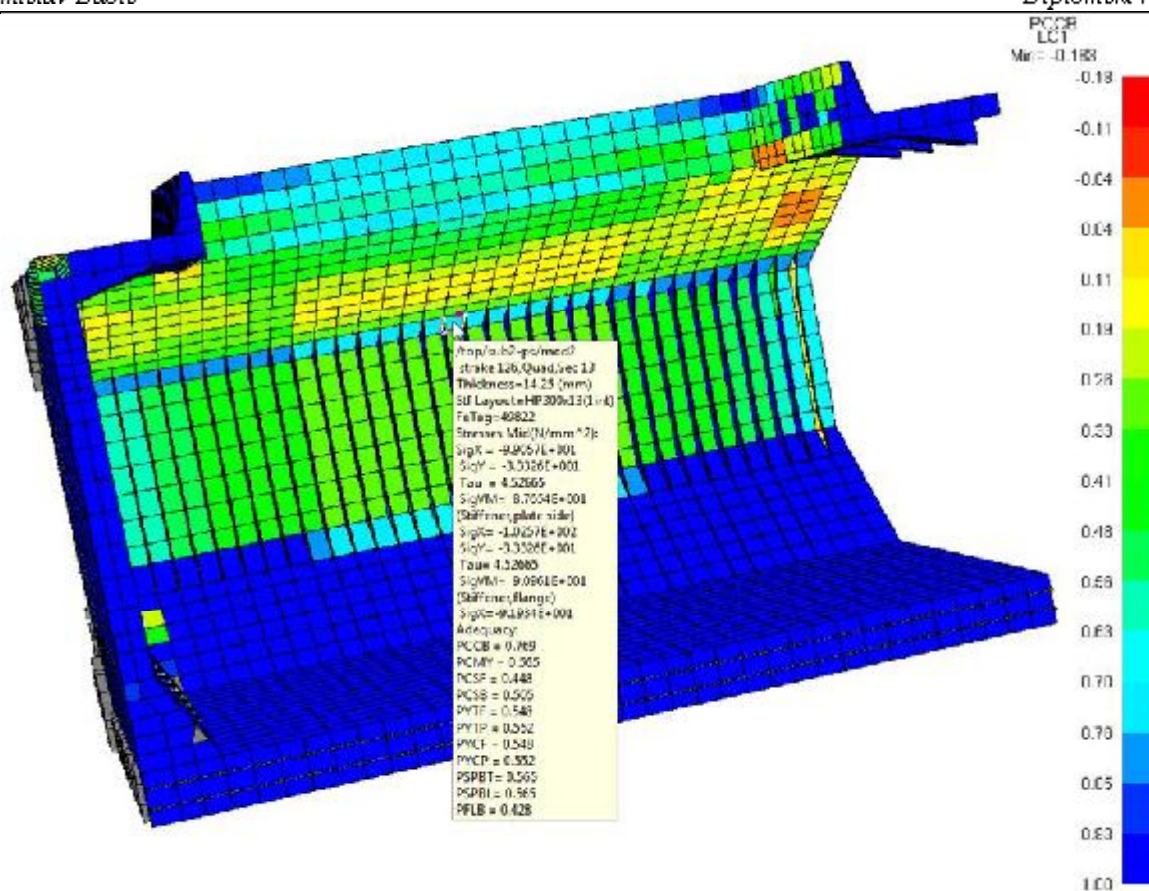
Slika 71. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplata boka za PCSF kriterij

Implementirano : povećanje debljine oplata boka 18.5→19.5 mm



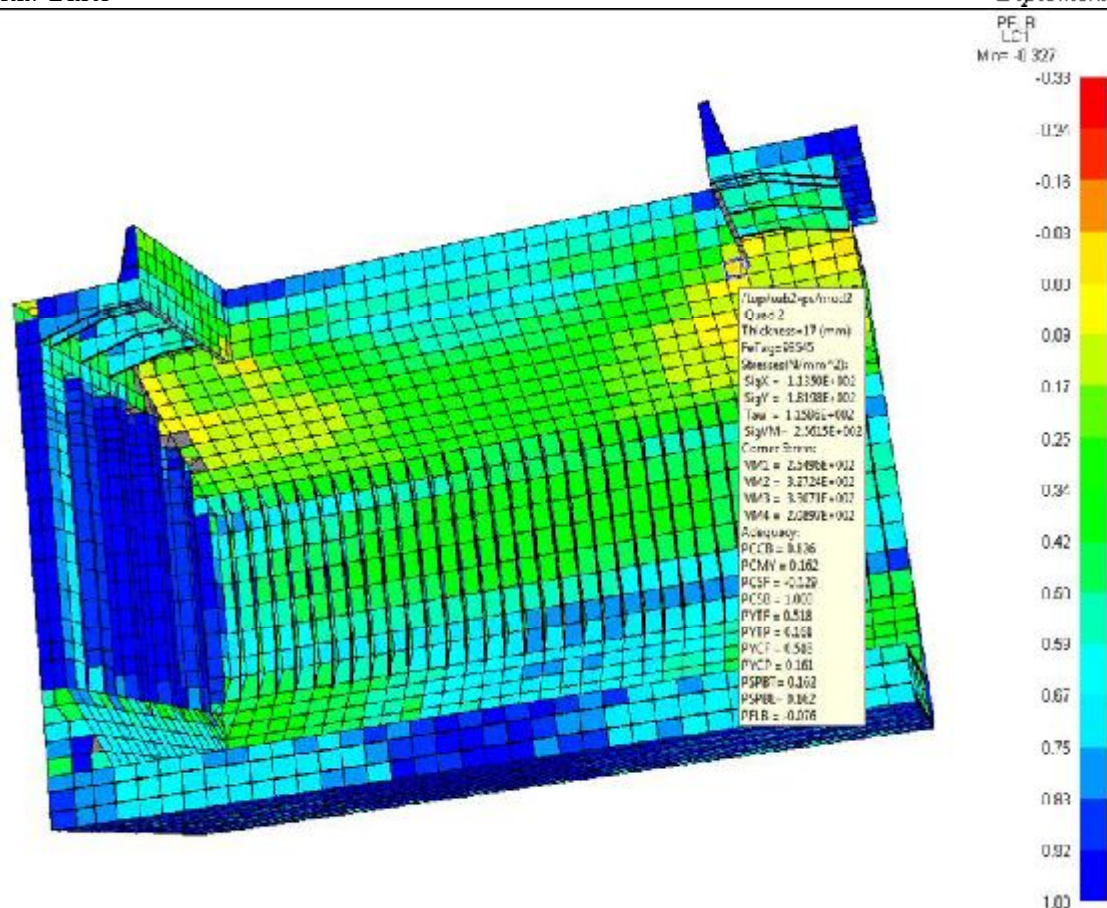
Slika 72. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture op late gornjeg uzvojnog tanka za PCCB kriterij

Implementirano : postavljanje poprečnih anti-buckling ukrepa FB 100x10 s razmakom 835 mm na rebrima 110-115 i 130-145



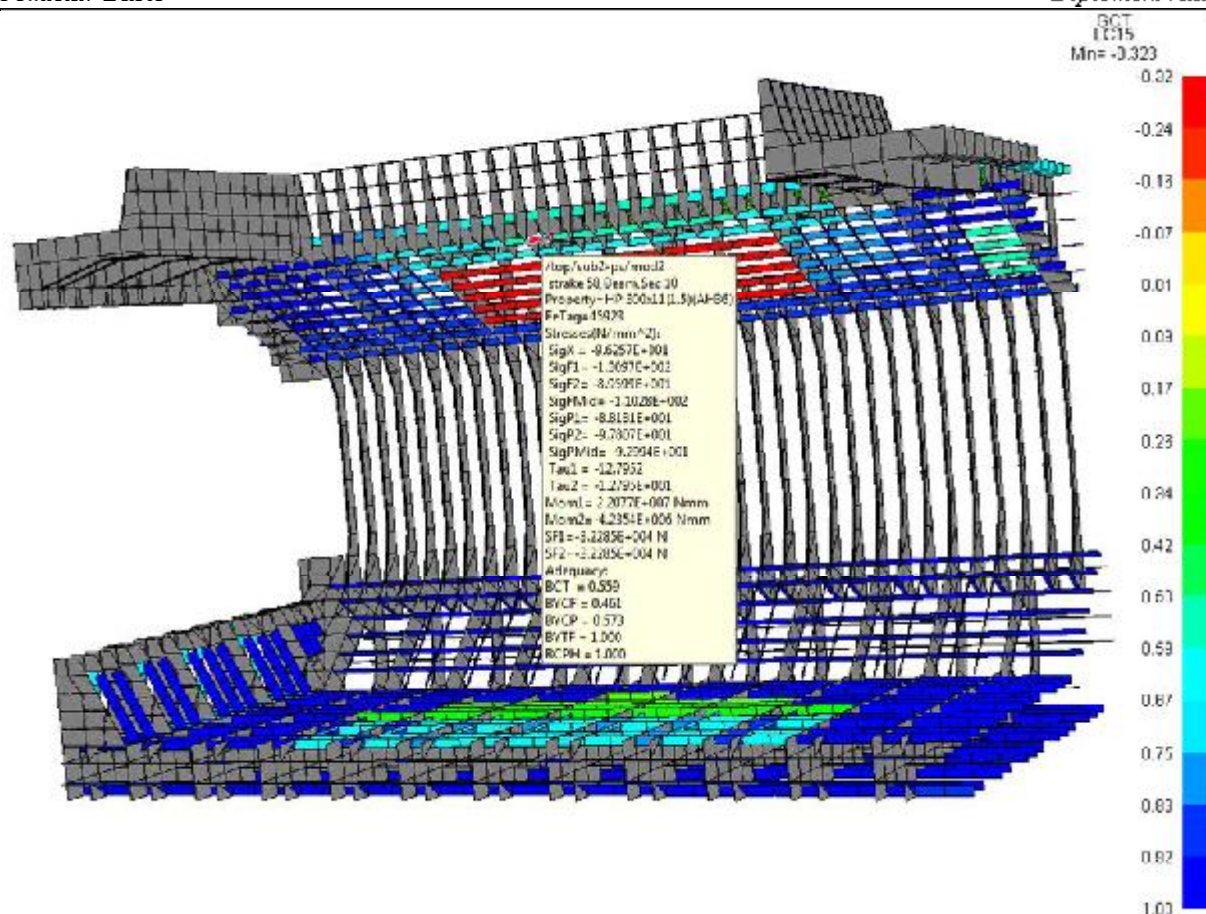
Slika 73. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture op late gornjeg uzvojnog tanka za PCCB kriterij

Implementirano : dodana uz dužna ukrepa između uzdužnjaka br. 9 i oplata boka HP 300x13



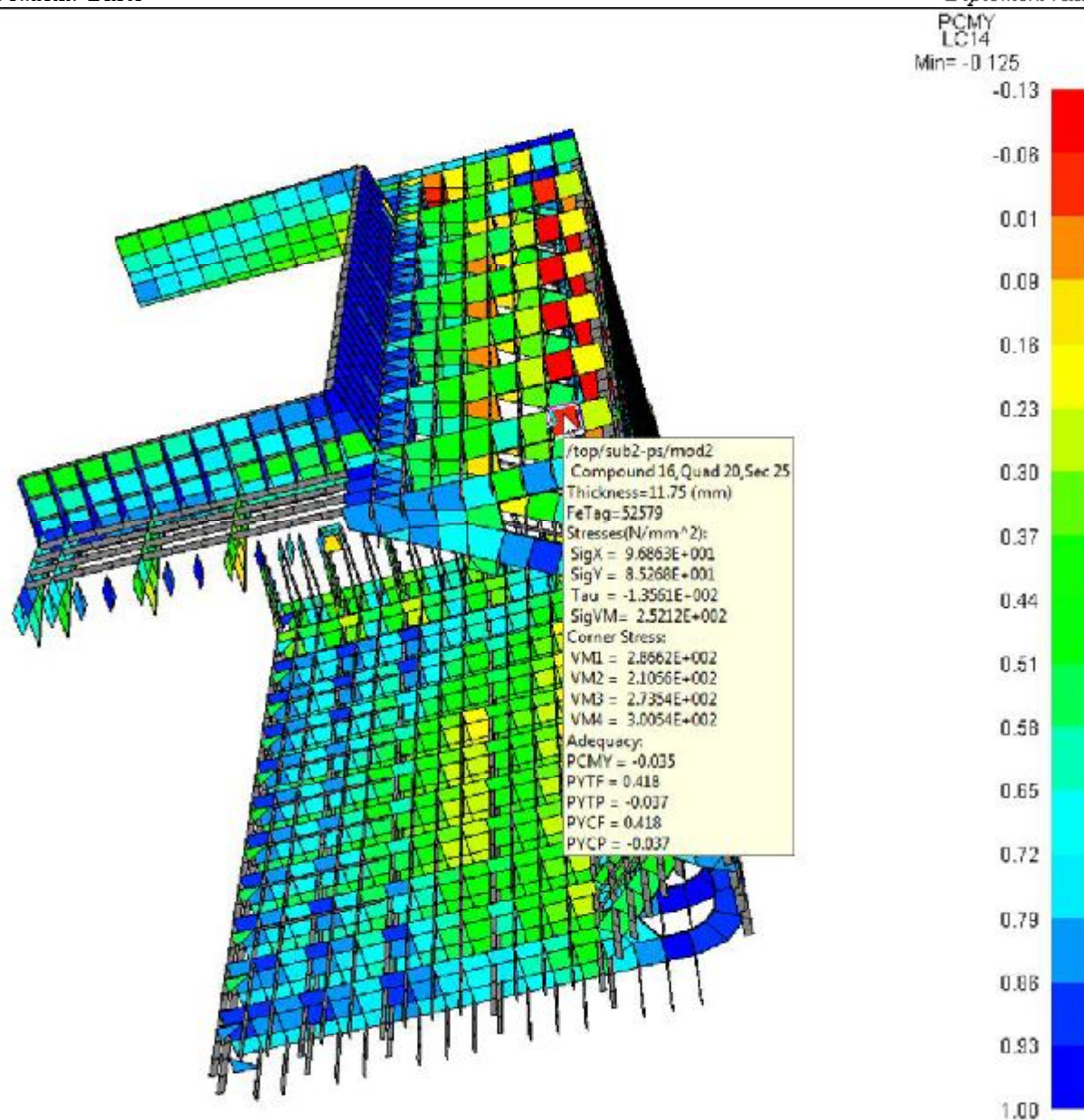
Slika 74. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture op late gornjeg uzvojnog tanka za PFLB kriterij

Implementirano : povećanje debljine panela oko otvora grotla sa 15→17 mm



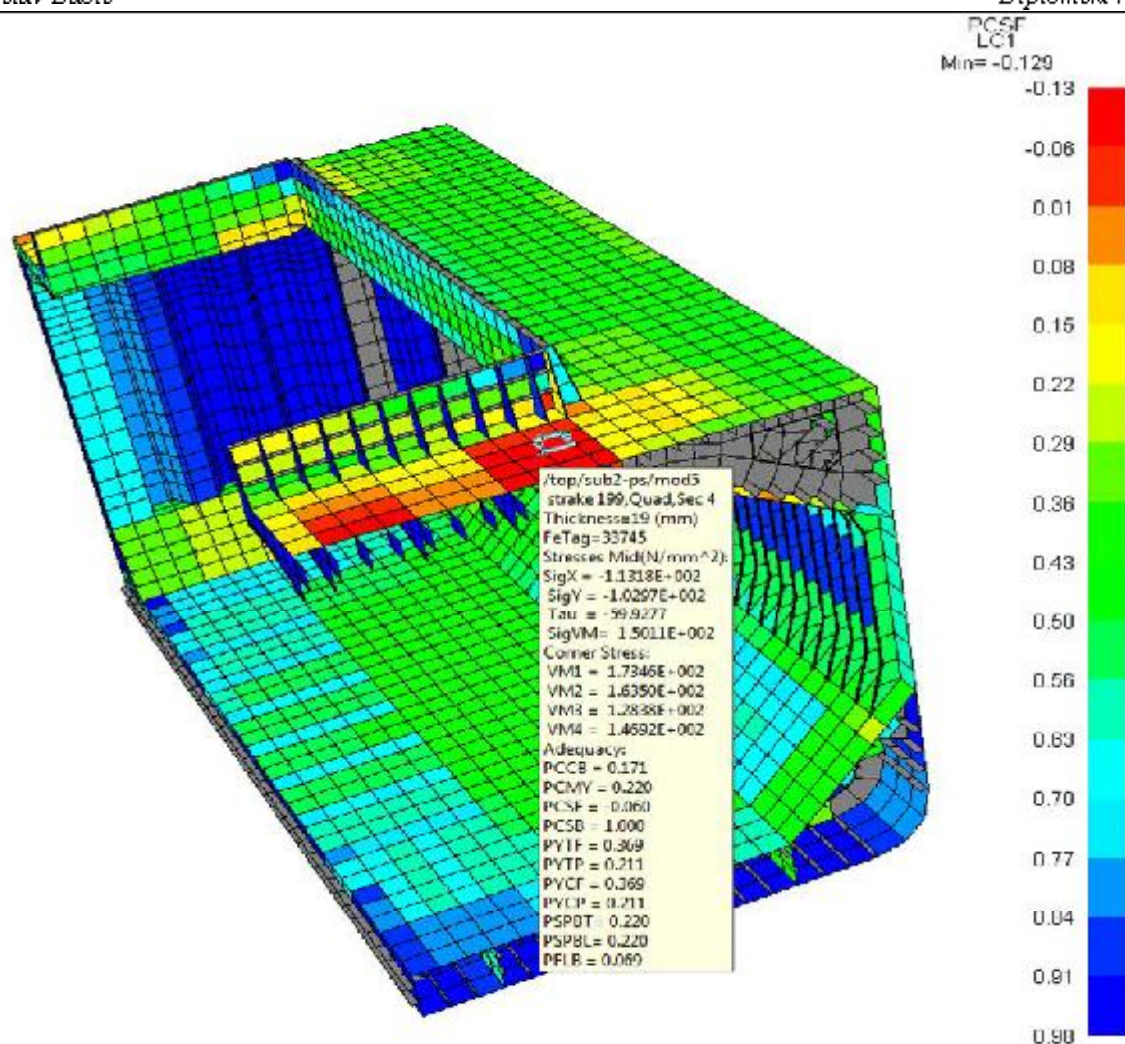
Slika 75. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture ukrepa gornjeg uzvojnog tanka za GCT kriterij

Implementirano : postavljeno koljeno 14mm do uzdužnjaka br. 2 sa razmakom 835mm



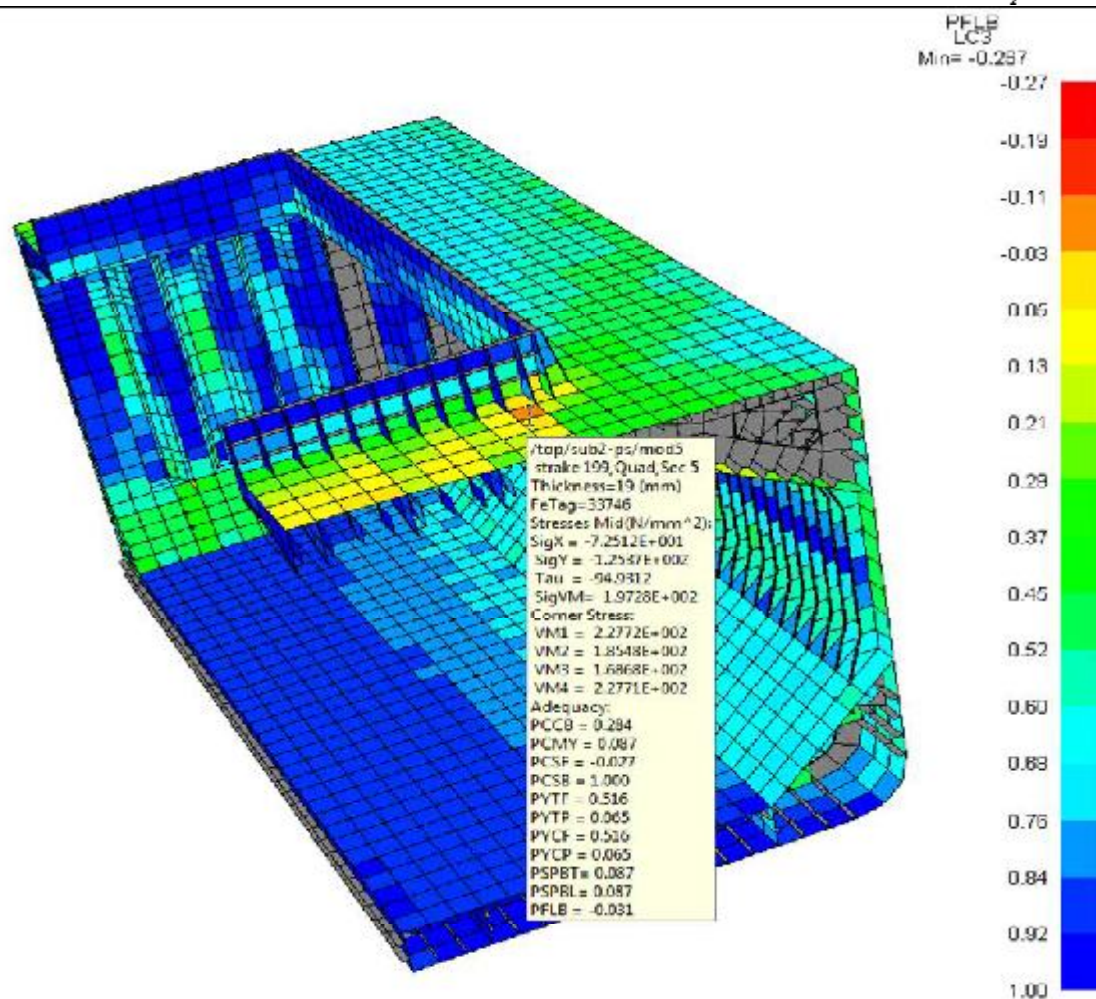
Slika 76. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture okvira go mjeg uzvojnog tanka
za PCMY kriterij

Implementirano : povećanje debljine okvira sa 12→14 mm



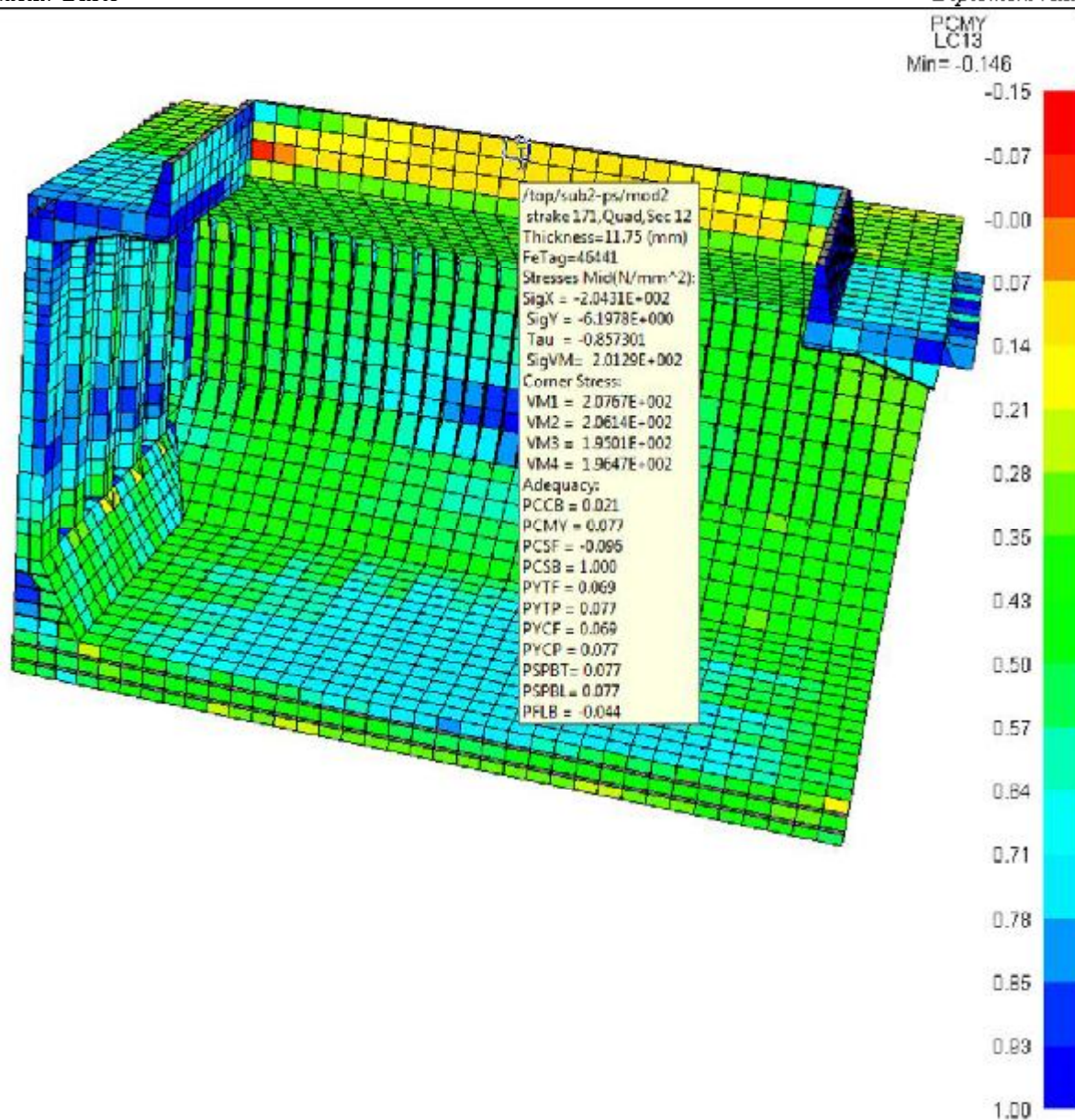
Slika 77. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture oplata palube između grotenih otvora za PCSF kriterij

Implementirano : povećanje debljine oplata palube 15.5→17.5 mm



Slika 78. Postignuti faktori podobnosti poboljšane strukture oplata palube između grotenih otvora za PFLB kriterij

Implementirano : povećanje debljine oplata palube 15.5→17.5 mm



Slika 79. Postignuti faktor podobnosti poboljšane strukture uzdužne pražnice grotla za PCMY kriterij

Implementirano : povećanje debljine oplata pražnice grotla sa 12→14mm

NAPOMENA:

U slučajevima prikazanim slikama 58, 64, 74, vidljivo je da ni nakon implementacije prijedloga kriterij PCCB nije zadovoljen. Stoga je provedena naknadna provjera prema formulama (opisane su u poglavlju 5. ovog rada) iz IACS Pravila [1] te je utvrđeno da je spomenuti kriterij „prestrog“.

Usporedba PCCB i IACS kriterija za kombinirano bi-aksijalno i smično izvijanje dana je **Tablicom 15**.

Tablica 13. Usporedba PCCB i IACS kriterija

Pozicija	PCCB-prijedlog	IACS-kriterij/(C)
dno	-0.032	0.07/(0.87)
uzdužnjak na 11690 od CL-a t=9mm	-0.024	0/(1)
oplata wing tanka	-0.006	0.06/(0.89)

IACS kriteriji provjeravani su prema formuli iz Ch. Sec. 3, 324 [1]:

$$\left(\frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x R_{eH}}\right)^{e1} + \left(\frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y R_{eH}}\right)^{e2} - B \left(\frac{\sigma_x \sigma_y S^2}{R_{eH}^2}\right)^{e1} + \left(\frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_z R_{eH}}\right)^{e3} \leq 1.0$$

6. ZAKLJUČAK

Nesreće brodova na moru u pravilu imaju za posljedicu velike gubitke. Ti gubitci su većinom materijalni, u smislu gubitka broda ili tereta, tj. gubitka mogućnosti zarade. Međutim nesreće mogu na žalost odnositi i ljudske živote. Kako bi se nesreće izbjegle ili pak smanjile na najmanju moguću mjeru donose se sve stroža pravila. Takva su i Usuglašena IACS Pravila.

Ovaj rad bavi se dijelom Pravila koja se odnose na povećanje čvrstoće konstrukcije broda, odnosno povećanja sigurnosti ljudi koji na njemu plove u prvom redu, ali i tereta koji on prevozi.

Izrađena su dva MKE modela prema tehničkoj dokumentaciji iz Brodosplita dostupnoj na FSB-u. Na MKE modelima broda Prototip i broda Prijedlog izvršena je analiza konstrukcije koja je bila opterećena sa 19 različitih slučajeva opterećenja. Njihovom implementacijom dobiven je odziv konstrukcije u vidu naprezanja njezinih strukturnih dijelova. Uslijed djelovanja navedenih slučajeva opterećenja na MKE model identificirana je mogućnost ozbiljnih oštećenja brodske konstrukcije. Oštećenja su se manifestirala kao izvijanje i/ili popuštanje oplata, ukrepa, rebrenica ili jakih nosača u dvodnu. Najviše mogućnosti oštećenja je bilo na oplati dna, pokrovu dvodna, oplati gornjeg uzvojnog tanka, te oko grotlenih otvora, gdje je poznato da su kod brodova za rasuti teret velike koncentracije naprezanja.

Stoga su kroz novi novi MKE model (Prijedlog) poduzete mjere poboljšanja konstrukcije i zadovoljenja Pravila. Kako bi postigli navedeno ugrađivane su: -uzdužne anti-buckling ukrepe FB 100x10 na oplatu dna. Nadalje povećavala se debljina rebrenica sa 12 na 14 mm. Podebljavali su se i jaki uzdužni nosači u dvodnu do poprečnih stula. Anti-bucklig ukrepe FB 100x10 postavljane su i na pokrovu dvodna te na oplati donjeg uzvojnog tanka. Bok broda podebljan je za 1 mm, sa 18.5 na 19.5 mm. Ovo su samo neki od zahvata na konstrukciji koji su u konačnici rezultirali sigurnijom konstrukcijom. To je neminovno imalo za posljedicu i povećanje ukupne težine teretnog prostora u iznosu do 5%, što je u okviru očekivanog.

Kao sljedeći korak predlaže se modeliranje „fine“ mreže konačnih elemenata u područjima oko grotlenih otvora gdje se pojavljuje najveća koncentracija naprezanja.

7. LITERATURA

- [1] IACS: *Common Structural Rules for Bulk Carriers*, 2006
- [2] *MAESTRO Version 8.9.3, Program documentation*, Drs Defense Solutions, LCC Advanced Marine Technology Center, 160 Sallitt Drive, Stevensville, MD 21666, USA.
- [3] *The Society of Naval Architects and Marine Engineers. Ship Design and Construction*, 2004.
- [4] Internet: *Summary of the Common Structural Rules*
<http://www.iacs.org.uk/publications>
- [5] Brodosplit: Tehnička dokumentacija za novogradnju 466 i 467, 2008.
- [6] Brodosplit: Knjiga trim a i stabiliteta za novogradnju 466 i 467, 2008.

8. PRILOG

Proračun u *MathCad*u za LC 4.

IACS - CSR(BC)

Ch. 4

Sec 2

OPĆI PODACI BRODA $L_{\text{wl}} := 189.1 \text{ m}$ Duljina $B := 32.2 \text{ m}$ Širina $T_{\text{wl}} := 12.31 \text{ m}$ Gaz $T_{\text{LC}} := 10 \text{ m}$ Gaz za promatna stanja opterećenja $T_{\text{S}} := 12.31 \text{ m}$ Projektirani gaz $D := 17.1 \text{ m}$ Ship depth $GM := 0.12B$ Metacentarska visina $C_B := 0.8322$ Blok koeficijent $V_{\text{wl}} := 15 \text{ kn}$ Brzina broda $f_p := 1$ faktor vjerojatnosti $\beta_{\text{wl}} := f_p \left(1.58 - 0.47 \cdot C_B \right) \cdot \left(\frac{2.4}{\sqrt{L}} + \frac{34}{L} - \frac{600}{L^2} \right)$ Parametar akceleracije $C_{\text{wl}} := 9.59$ Valni koeficijent**Section 2 - AKCELERACIJE BRODA****2. Apsolutne akceleracije broda****2.1. Valjanje** $k_T := 11.28 \text{ m}$ Polumjer zakreta kod valjanja $k_b := 1.2$ Za brodove bez ljuljne kobilice $T_R := \frac{2.3 \cdot k_T}{\sqrt{GM}}$ $T_R = 13.19 \text{ s}$ Period valjanja $\theta := \frac{9000 \left(1.25 - 0.025 \cdot T_R \right) \cdot f_p \cdot k_b}{(B + 75) \cdot 3.14}$ $\theta = 29.515 \text{ deg}$ Amplituda jednog zakreta valjanja**2.2. Postranje** $\lambda := 0.6 \left(1 + \frac{T_{\text{LC}}}{T_{\text{S}}} \right) \cdot L$

$$T_P := \sqrt{\frac{2 \cdot 3.14 \cdot \lambda}{9.81}}$$

$$T_P = 11.489 \text{ s} \quad \text{Period postranja}$$

$$\Phi := f_p \frac{960}{L} \sqrt[4]{\frac{V}{C_B}}$$

$$\Phi = 10.416 \text{ deg} \quad \text{Amplituda posrtanja}$$

2.3. Poniranje

$$a_{\text{heave}} := a_0 \cdot 9.81$$

$$a_{\text{heave}} = 3.925 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{Vertikalna akceleracija}$$

2.4. Zanošenje

$$a_{\text{sway}} := 0.3 \cdot a_0 \cdot 9.81$$

$$a_{\text{sway}} = 1.178 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

2.5. Zalijetanje

$$a_{\text{surge}} := 0.2 \cdot a_0 \cdot 9.81$$

$$a_{\text{surge}} = 0.785 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{Poprečna akceleracija}$$

3. Relativne akceleracije broda

$$a_{\text{roll}} := \Phi \frac{3.14}{180} \left(\frac{2 \cdot 3.14}{T_R} \right)^2$$

$$a_{\text{roll}} = 0.117 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad \text{Poprečna akceleracija od valjanja}$$

$$a_{\text{pitch}} := \Phi \frac{3.14}{180} \left(\frac{2 \cdot 3.14}{T_P} \right)^2$$

$$a_{\text{pitch}} = 0.054 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad \text{Vertikalna akceleracija od postranja}$$

IACS - CSR(BC)

Ch. 4

Sec 3

Section 3 - OPTEREĆENJE TRUPA

3. Valno opterećenje

3.1. Vertikalni moment savijanja

3.1.1. Neoštećeno stanje

 $F_M = 1$ faktor distribucije

$$M_{WVH} = 190 F_M f_p C L^2 B C_B \cdot 10^{-3}$$

$$M_{WVH} = 1.763 \times 10^6 \quad \text{kNm} \quad \text{Pregib}$$

$$M_{WVS} = 110 F_M f_p C L^2 B (C_B + 0.7) \cdot 10^{-3}$$

$$M_{WVS} = 1.879 \times 10^6 \quad \text{kNm} \quad \text{Progib}$$

3.1.2. Naplavljeno stanje

$$M_{WV} = \text{if}(M_{WVH} > M_{WVS}, M_{WVH}, M_{WVS})$$

$$M_{WVP} = 0.8 M_{WV}$$

$$M_{WVP} = 1.503 \times 10^6 \quad \text{kNm} \quad \text{Oštećeno stanje}$$

3.1.3. Uvjeti na vezu

$$M_{WVP} = 0.4 M_{WV}$$

$$M_{WVP} = 7.517 \times 10^5 \quad \text{kNm}$$

3.2. Vertikalna valna smič na sila

3.2.1. Neoštećeno stanje

$$A = \frac{190 C_B}{110 (C_B + 0.7)}$$

$$A = 0.938$$

$$F_{Q\text{positive}}(x) := \begin{cases} 4,6 \cdot A \cdot \frac{x}{L} & \text{if } 0 \leq x < 0,2 \cdot L \\ 0,92 \cdot A & \text{if } 0,2L \leq x \leq 0,3L \\ (9,2 \cdot A - 7) \cdot \left(0,4 - \frac{x}{L}\right) + 0,7 & \text{if } 0,3L < x < 0,4L \\ 0,7 & \text{if } 0,4L \leq x \leq 0,6L \\ 3 \cdot \left(\frac{x}{L} - 0,6\right) + 0,7 & \text{if } 0,6L < x < 0,7 \cdot x \\ 1 & \text{if } 0,7L \leq x \leq 0,85L \\ 6,67 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) & \text{if } 0,85L < x \leq L \end{cases} \quad x := 95 \quad \text{m}$$

$F_{Q\text{positive}}(x) = 0,7$ Distribucijski faktor za pozitivnu valnu smičnu silu

$$F_{Q\text{negative}}(x) := \begin{cases} 4,6 \cdot \frac{x}{L} & \text{if } 0 \leq x < 0,2 \cdot L \\ 0,92 & \text{if } 0,2L \leq x \leq 0,3L \\ 2,2 \cdot \left(0,4 - \frac{x}{L}\right) + 0,7 & \text{if } 0,3L < x < 0,4L \\ 0,7 & \text{if } 0,4L \leq x \leq 0,6L \\ (10A - 7) \cdot \left(\frac{x}{L} - 0,6\right) + 0,7 & \text{if } 0,6L < x < 0,7 \cdot x \\ A & \text{if } 0,7L \leq x \leq 0,85L \\ 6,67 \cdot \left(1 - \frac{x}{L}\right) & \text{if } 0,85L < x \leq L \end{cases}$$

$F_{Q\text{negative}}(x) = 0,7$ Distribucijski faktor za negativnu valnu smičnu silu

$$Q_{WV\text{positive}} := 30 \cdot F_{Q\text{positive}}(x) \cdot f_p \cdot C \cdot L \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-2}$$

$$Q_{WV\text{positive}} = 1,889 \times 10^4 \quad \text{kN} \quad \text{Pozitivna smična sila}$$

$$Q_{WV\text{negative}} := -30 \cdot F_{Q\text{negative}}(x) \cdot f_p \cdot C \cdot L \cdot B \cdot (C_B + 0,7) \cdot 10^{-2}$$

$$Q_{WV\text{negative}} = -1,889 \times 10^4 \quad \text{kN} \quad \text{Negativna smična sila}$$

$$Q_{WV} := \text{if}(Q_{WV\text{positive}} > Q_{WV\text{negative}}, Q_{WV\text{positive}}, Q_{WV\text{negative}})$$

$$Q_{WV} = 1,889 \times 10^4 \quad \text{Smična sila}$$

3.2.2. Oštećeno stanje

$$Q_{WVF} := 0,8 \cdot Q_{WV}$$

$$Q_{WVF} = 1,511 \times 10^4 \quad \text{kN}$$

3.2.3. Uvjeti na vezu

$$Q_{WVP} = 0.4 Q_{WV}$$

$$Q_{WVP} = 7.557 \times 10^3 \quad \text{kN}$$

3.3. Horizontalni valni moment savijanja

$$M_{WH} = \left(0.3 + \frac{L}{2000} \right) F_M \cdot f_p \cdot C_L^2 \cdot T_{LC} \cdot C_B$$

$$M_{WH} = 1.137 \times 10^6 \quad \text{kNm}$$

3.4. Valni torzioni moment

$$F_{T1} = \sin\left(\frac{2.3.14 \cdot x}{L}\right)$$

$$F_{T2} = \sin\left(\frac{3.14 \cdot x}{L}\right)^2$$

$$M_{WT1} = 0.4 \cdot C_L \cdot \sqrt{\frac{L}{T}} \cdot B^2 \cdot D \cdot C_B \cdot F_{T1}$$

$$M_{WT1} = -13.538 \quad \text{kNm}$$

$$M_{WT2} = 0.22 \cdot C_L \cdot L \cdot B^2 \cdot C_B \cdot F_{T2}$$

$$M_{WT2} = 3.466 \times 10^5 \quad \text{kNm}$$

$$M_{WT} = f_p \cdot (|M_{WT1}| + |M_{WT2}|)$$

$$M_{WT} = 3.466 \times 10^5 \quad \text{kNm}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{ORIGIN} := 1 \\
 & \text{COE}(T_{LC}) := \begin{pmatrix}
 H1 & H2 & F1 & F2 & R1 & R2 & P1 & P2 \\
 -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S} & \frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4 & \text{MWV} \\
 -1 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S} & \frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4 & \text{QWV} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S} & \frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2 & 0 & 0 & \text{MWH} \\
 -0.8 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{ASURGE} \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{APITCHX} \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{GSINH} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & \text{ASWAY} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0.3 & -0.3 & \text{AROLLY} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0.3 & -0.3 & \text{GSINTHETA} \\
 0.6 \frac{T_{LC}}{T_S} & -0.6 \frac{T_{LC}}{T_S} & 0 & 0 & \frac{\sqrt{L}}{40} & -\frac{\sqrt{L}}{40} & 1 & -1 & \text{AHEAVE} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0.3 & -0.3 & \text{AROLLZ} \\
 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{APITCHZ}
 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

2. Poterećenja na mirnoj vodi

2.2. Moment savijanja na mirnoj vodi

$$M_{SWH} := 175 \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \cdot 10^{-3} - M_{WVH}$$

$$M_{SWH} = 1.227 \times 10^6 \quad \text{kNm} \quad \text{Pregib}$$

$$M_{SWS} := 175 \cdot C \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \cdot 10^{-3} - M_{WVS}$$

$$M_{SWS} = 1.11 \times 10^6 \quad \text{Progib}$$

ODABRANO STANJE KRČANJA

LOADCASE 4 - F2 + Loading condition 41

$$i := 4 \quad \text{- za F2- hog}$$

$$T_{LC} := 0.83 \cdot T_S \quad \text{- mean LC draught}$$

$$T_{LC} = 10.25$$

$$M_{SWTSbook} := -506778$$

$$Q_{SW} := -39656$$

$$M_{SW} := \max(M_{SWTSbook}, M_{SWH})$$

$$M_{SW} = 1.227 \times 10^6$$

Momenti savijanja, smične sile

$$M_{VTOTH} := \text{COE}(T_{LC})_{1,i} \cdot M_{WVH} + M_{SW}$$

$$M_{VTOTH} = 2.99 \times 10^6 \quad \text{kNm}$$

$$Q_{wv} := \text{COE}(T_{LC})2, i \cdot Q_{WV \text{ positive}} \quad Q_{wv} = 1.889 \times 10^4 \quad \text{kN}$$

$$M_{wh} := \text{COE}(T_{LC})3, i \cdot M_{WH} \quad M_{wh} = 0 \quad \text{kNm}$$

Linearne akceleracije

$$A_{heave} := \text{COE}(T_{LC})10, i \cdot a_{heave} \quad A_{heave} = 0 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$A_{surge} := \text{COE}(T_{LC})4, i \cdot a_{surge} \quad A_{surge} = 0 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$A_{sway} := \text{COE}(T_{LC})7, i \cdot a_{sway} \quad A_{sway} = 0 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Kutne akceleracije

$$A_{pitch} := \text{COE}(T_{LC})12, i \cdot a_{pitch} \quad A_{pitch} = 0 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

$$A_{roll} := \text{COE}(T_{LC})8, i \cdot a_{roll} \quad A_{roll} = 0 \quad \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad \text{lambda}(i, T_{LC}) = 176.987 \text{ m}$$

OPTEREĆENJE ZBOG SUHOG TERETA

$$S_0 = 138.35 \text{ m}^2$$

$$V_{HC} = 707.19 \text{ m}^3$$

$$h_{HPU} = 10.83 \text{ m}$$

$$l_H = 29.34 \text{ m}$$

$$h_{HPL} = 4.3 \text{ m}$$

$$h_{DB} = 1.7 \text{ m}$$

$$b_{IB} = 23.38 \text{ m}$$

$$\psi = 0.5236 \text{ rad}$$

$$B_H = 30.10 \text{ m}$$

$$x_G = 95 \text{ m}$$

$$y_G = 0$$

$$z_G = 8.4 \text{ m}$$

$$M = 13549 \text{ t}$$

$$\rho_C = 1 \quad \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$$

$$V_{TS} = 123.23 \text{ m}^3$$

$$K_C(\alpha) := \cos(\alpha)^2 + (1 - \sin(\psi)) \cdot \sin(\alpha)^2$$

$$\alpha = 0 \quad K_C(\alpha) = 1 \quad \text{-inner bottom-kut=0}$$

$$\alpha_{\text{H}} := 0.768 \quad K_C(\alpha) = 0.759 \quad \text{-hopper plating-kut=44}$$

$$\alpha_{\text{V}} := 1.57 \quad K_C(\alpha) = 0.5 \quad \text{-side-vertical BHD-kut=90}$$

$$R(x) := z - \min\left(\frac{D}{2}, \frac{T_{LC}}{2} + \frac{D}{4}\right)$$

$$R(0) = -8.55 \quad T_{LC} = 10.25$$

$$a_Y(y, z) := COB(T_{LC})_0 + 9.80665 \cdot \sin(0.017453 \cdot \theta) + A_{\text{sway}} + A_{\text{roll}} R(x)$$

$$a_Z(y, z) := A_{\text{heave}} + A_{\text{roll}} \cdot y + A_{\text{pitch}} (x - 0.45 \cdot L)$$

Teret napunjen do vrha skladišta

$$S_A := S_0 + \frac{V_{HC}}{l_H} \quad S_A = 162.453 \quad \text{m}^2$$

$$h_0 := \frac{S_A}{B_H} \quad h_0 = 5.397 \quad \text{m}$$

$$h_{C2} := h_{\text{HPU}} + h_0 \quad h_{C2} = 16.227 \quad \text{m}$$

$$h_{C2\text{maestro}} := h_{\text{HPU}} + h_0 + h_{\text{DB}} \quad h_{\text{HPUmaestro}} := h_{\text{HPU}} + h_{\text{DB}}$$

LOADCASE 4 - F2 + Loading condition 41

$$h_{C2\text{maestro}} = 17.927 \quad h_{\text{HPUmaestro}} = 12.53$$

Opterećenje rasutog tereta na mirnoj vodi:

$$p_{CS}(y, z, \alpha) := \max[p_C - 9.80665 \cdot K_C(\alpha) (h_{C2} + h_{\text{DB}} - z), 0]$$

Inercijsko opterećenje rasutog tereta:

$$p_{CW}(y, z, \alpha) := p_C - [0.25 \cdot a_Y(y, z) (y - y_G) + K_C(\alpha) \cdot a_Z(y, z) (h_{C2} + h_{\text{DB}} - z)]$$

UKUPNO opterećenje rasutog tereta:

$$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) + P_{\text{CW}}(y, z, \alpha)$$

$z := 12.53$	$y := 16.12$	$\alpha := 1.57$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 26.464$	endpt 21
$z := 11.2$	$y := 16.12$	$\alpha := 1.57$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 32.985$	endpt 20
$z := 9.3$	$y := 16.12$	$\alpha := 1.57$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 42.302$	endpt 31
$z := 7.4$	$y := 16.12$	$\alpha := 1.57$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 51.618$	endpt 19
$z := 6.0$	$y := 16.12$	$\alpha := 1.57$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 58.482$	endpt 18
$z := 6.0$	$y := 16.12$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 116.965$	endpt 18
$z := 4.95$	$y := 15.09$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 127.262$	endpt 37
$z := 3.93$	$y := 13.97$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 137.265$	endpt 15
$z := 2.81$	$y := 12.84$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 148.248$	endpt 14
$z := 1.7$	$y := 11.69$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 13
$z := 1.7$	$y := 11.69$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 13
$z := 1.7$	$y := 10.02$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 35
$z := 1.7$	$y := 8.35$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 12
$z := 1.7$	$y := 6.68$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 33
$z := 1.7$	$y := 5.01$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 11
$z := 1.7$	$y := 2.5$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 10
$z := 1.7$	$y := 0$	$\alpha := 0$	$P_{\text{tot}}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 9

Opterećenje rasutog tereta na mimos vodi:

$P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) := \max[p_C - 9.80665 \cdot K_C(\alpha) \cdot (h_{C2} + h_{DB} - z), 0]$	$\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$
$z := 12.53$ $y := 16.12$ $\alpha := 1.57$ $P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) = 26.464$	endpt 21
$z := 11.2$ $y := 16.12$ $\alpha := 1.57$ $P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) = 32.985$	endpt 20
$z := 9.3$ $y := 16.12$ $\alpha := 1.57$ $P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) = 42.302$	endpt 31
$z := 7.4$ $y := 16.12$ $\alpha := 1.57$ $P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) = 51.618$	endpt 19
$z := 6.0$ $y := 16.12$ $\alpha := 1.57$ $P_{\text{CS}}(y, z, \alpha) = 58.482$	endpt 18

$z_{uc} = 4.95$	$y_{uc} = 15.09$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 96.553$	endpt 37
$z_{uc} = 3.93$	$y_{uc} = 13.97$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 104.142$	endpt 15
$z_{uc} = 2.81$	$y_{uc} = 12.84$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 112.476$	endpt 14
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 11.69$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 120.734$	endpt 13
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 11.69$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 13
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 10.02$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 35
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 8.35$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 12
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 6.68$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 33
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 5.01$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 11
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 2.5$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 10
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 0$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 159.134$	endpt 9
$z_{uc} = 5.475$	$y_{uc} = 15.605$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 92.647$	
$z_{uc} = 5.475$	$y_{uc} = 15.605$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CS}(y, z, \alpha) = 122.114$	

Inercijsko opterećenje rasutog tereta:

$P_{CW}(y, z, \alpha) = P_C [0.25 \cdot a_Y(y, z) \cdot (y - y_G) + K_C(\alpha) \cdot a_Z(y, z) \cdot (h_{C2} + h_{DB} - z)]$				
$z_{uc} = 12.53$	$y_{uc} = 16.12$	$\alpha_{uc} = 1.57$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 21
$z_{uc} = 11.2$	$y_{uc} = 16.12$	$\alpha_{uc} = 1.57$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 20
$z_{uc} = 9.3$	$y_{uc} = 16.12$	$\alpha_{uc} = 1.57$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 31
$z_{uc} = 7.4$	$y_{uc} = 16.12$	$\alpha_{uc} = 1.57$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 19
$z_{uc} = 6.0$	$y_{uc} = 16.12$	$\alpha_{uc} = 1.57$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 18
$z_{uc} = 4.95$	$y_{uc} = 15.09$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 37
$z_{uc} = 3.93$	$y_{uc} = 13.97$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 15
$z_{uc} = 2.81$	$y_{uc} = 12.84$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 14
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 11.69$	$\alpha_{uc} = 0.768$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 13
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 11.69$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 13
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 10.02$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 35
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 8.35$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 12
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 6.68$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 33
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 5.01$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 11
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 2.5$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 10
$z_{uc} = 1.7$	$y_{uc} = 0$	$\alpha_{uc} = 0$	$P_{CW}(y, z, \alpha) = 0$	endpt 9

LOADCASE 4 - F2 + Loading condition 41**Smično opterećenje rasutog tereta na mirnoj vodi:**

$$p_{CSS}(y, z, \alpha) := \rho_C \cdot 9.80665 \cdot (1 - K_C(\alpha)) \cdot \frac{h_{C2} + h_{DB} - z}{\tan(\alpha)}$$

Smično opterećenje rasutog tereta na valovima:

$$p_{CWS}(y, z, \alpha) := \rho_C \cdot a_Y(y, z) \cdot (1 - K_C(\alpha)) \cdot \frac{h_{C2} + h_{DB} - z}{\tan(\alpha)}$$

UKUPNO opterećenje smične sile

$$p_{tots}(y, z, \alpha) := p_{CSS}(y, z, \alpha) + p_{CWS}(y, z, \alpha)$$

$$l_{hold} := 26.08$$

PS side-----positive force**SB side-----negative force**

$$F_z(y, z, \alpha, k) := p_{tots}(y, z, \alpha) \cdot k \cdot l_{hold}^2 \cdot \cos(\alpha) \cdot 1000$$

$z_{m1} := 5.498$	$y_{m1} := 15.603$	$\alpha_{m1} := 0.768$	$k_{m1} := 1.44$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 30.454$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 1.645 \times 10^6$ (N)
$z_{m2} := 4.741$	$y_{m2} := 14.823$	$\alpha_{m2} := 0.768$	$k_{m2} := 0.7675$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 32.308$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 9.303 \times 10^5$ (N)
$z_{m3} := 4.207$	$y_{m3} := 14.273$	$\alpha_{m3} := 0.768$	$k_{m3} := 0.7675$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 33.617$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 9.68 \times 10^5$ (N)
$z_{m4} := 3.65$	$y_{m4} := 13.699$	$\alpha_{m4} := 0.768$	$k_{m4} := 0.8$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 34.982$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 1.05 \times 10^6$ (N)
$z_{m5} := 3.093$	$y_{m5} := 13.125$	$\alpha_{m5} := 0.768$	$k_{m5} := 0.8$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 36.346$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 1.091 \times 10^6$ (N)
$z_{m6} := 2.535$	$y_{m6} := 12.551$	$\alpha_{m6} := 0.768$	$k_{m6} := 0.8$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 37.714$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 1.132 \times 10^6$ (N)
$z_{m7} := 1.978$	$y_{m7} := 11.977$	$\alpha_{m7} := 0.768$	$k_{m7} := 0.8$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 39.078$	$F_z(y, z, \alpha, k) = 1.173 \times 10^6$ (N)

$$K_C(\alpha) = 0.759$$

$$F_{z1}(y, z, \alpha, k) := p_{tots}(y, z, \alpha) \cdot k \cdot l_{hold}^2 \cdot 0.719 \cdot 1000$$

$$\cos(\alpha) = 0.719$$

$z_{m8} := 2.255$	$y_{m8} := 12.265$	$\alpha_{m8} := 0.768$	$k_{m8} := 1.6$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 116.605$	$F_{z1}(y, z, \alpha, k) = 3.498 \times 10^6$
$z_{m9} := 2.255$	$y_{m9} := 12.265$	$\alpha_{m9} := 0$	$k_{m9} := 1.6$	$p_{tots}(y, z, \alpha) = 153.691$	$F_{z1}(y, z, \alpha, k) = 4.611 \times 10^6$

POKROV DVODNA Smična opterećenja za stanja krcanja P i R

$$p_{CWS}(y, z) := 0.75 \cdot \rho_C \cdot a_Y(y, z) \cdot h_{C2}$$

$$z_{m1} := 1.7 \quad y_{m1} := 11.69 \quad p_{CWS}(y, z) = 0 \quad a_Y(y, z) = 0$$

$$z_{m2} := 1.7 \quad y_{m2} := 7.525 \quad p_{CWS}(y, z) = 0 \quad a_Y(y, z) = 0$$

$$z_{m3} := 1.7 \quad y_{m3} := 0 \quad p_{CWS}(y, z) = 0 \quad a_Y(y, z) = 0$$

$$p_{CWSmax} := p_{CWS}(y, z) \quad p_{CWSmax} = 0$$

$$\text{Površina pokrova dvodna } A_{db} \quad A_{db} := 628.8 \quad m^2$$

$$\text{Sila za Maestro: } F_z := A_{db} \cdot p_{CWSmax} \cdot 1000 \quad F_z = 0$$